



**Flávio João Matias Rodrigues**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Análise experimental da resistência ao corte  
do núcleo interior de alvenarias de pano  
múltiplo consolidadas com injeção de *grouts***

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Professor Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques,  
Professor Catedrático, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Professor Doutor António Manuel Pinho Ramos

Arguente: Professor Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar

Vogal: Professor Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Junho de 2015



Copyright” , FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor Fernando Henriques, pela oportunidade concedida, compreensão e ajuda. Ainda pela referência de conhecimento demonstrada ao longo dos cinco anos de Mestrado Integrado.

Agradecer também ao Engenheiro Fernando Jorne pela partilha de conhecimento técnico na realização desta dissertação.

Um agradecimento especial à minha namorada Sara Alves e à minha irmã Nádia Rodrigues por todo o apoio e ajuda que me prestaram na elaboração deste trabalho.

Quero agradecer à minha família pelo apoio prestando durante a elaboração desta dissertação e por me terem dado a oportunidade de tirar um curso superior.

Por último, aos meus amigos por toda a compreensão e incentivo, a quem expresso a minha gratidão.



## **Preâmbulo**

A presente dissertação foi elaborada no âmbito do projecto de investigação Optimização de caldas para consolidação de alvenarias (PTDC/ECM/104376/2008) financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia do Ministério da Educação e Ciência, integrando-se no trabalho desenvolvido pela equipa de investigação coordenada pelo orientador desta dissertação, à qual o autor se juntou no período em que a esteve a preparar. Por essa razão a dissertação usa metodologias e conhecimentos desenvolvidos anteriormente no desenrolar do projecto e que em alguns casos não foram ainda publicados ou aguardam aceitação nas revistas a que foram submetidos.

Os diferentes horizontes temporais em que se desenvolvem as várias acções que integram o projecto, designadamente as teses de doutoramento em curso, as dissertações de mestrado já terminadas e a conclusão do próprio projecto, levam a que esta situação de utilização de conhecimentos, metodologias e informação ainda não publicados não seja condicionada, sob pena de inviabilizar a conclusão dos trabalhos cujo âmbito ou duração sejam mais reduzidos. Daí decorre que muita informação não publicada utilizada nesta dissertação seja propriedade intelectual de membros individuais da equipa ou da equipa de investigação em geral. Para clarificação do assunto e para além desta nota, foi utilizada a figura da comunicação particular para referenciar alguma dessa informação, sem prejuízo de existirem situações que possam não estar totalmente identificadas.





## Resumo

A quantidade de edifícios em degradação em Portugal que necessita de reabilitação é bastante elevada. As alvenarias antigas e históricas por vezes apresentam um estado avançado de degradação por ineficiente concepção ou por falta de manutenção.

Desta forma as alvenarias necessitam de acções de reforço e consolidação com o intuito de fortalecer as suas resistências a diversos tipos de carregamentos.

A presente dissertação está relacionada com uma técnica de consolidação das mais utilizadas e actuais, a injeção de *grouts* em alvenarias.

O reforço por injeção de *grouts* é bastante utilizado em alvenarias de pano múltiplo, onde permite uma maior coesão entre materiais, uniformidade de tensões e continuidade de panos.

Os principais objectivos de consolidação de uma alvenaria através da técnica de injeção de *grouts* são: a ocupação de espaços vazios de forma a aumentar a sua rigidez e a sua resistência; e o restabelecimento das ligações entre panos que ao longo do tempo deixou de existir, ou seja, um comportamento monolítico quando aplicado um carregamento vertical ou horizontal como um sismo. Daí a importância da análise de resistência ao corte numa da alvenaria de pano múltiplo.

O presente trabalho teve uma componente laboratorial muito extensa, onde se efectuou injeções em modelos paralelepípedicos simulando o núcleo interior de uma parede de alvenaria antiga.

O *grout* constituído por cal hidráulica, superplastificante e água foi injectado no molde com um dos meios porosos de um dos dois materiais, calcário ou cerâmico. Após a cura cortaram-se em fatias os provetes e analisou-se a velocidade de propagação de ultra-sons com dois tipos de transdutores (cilíndricos e cónicos). Os ensaios mecânicos utilizados foram o *diagonal test* e o ensaio de corte directo de modo a determinar a resistência ao corte e finalmente comparou-se os valores dos ensaios para determinação das propriedades. Ainda com o intuito de avaliar as ligações *grout*-partícula do meio poroso foram avaliadas algumas fotografias tiradas a partir da lupa binocular.

A técnica de injeção de *grouts* demonstrou-se uma técnica muito interessante e eficiente na análise de corte, no entanto esta técnica apresenta melhores resultados quando é utilizada em consonância com outras técnicas.

**Termos chave:** injeção de *grouts*, ensaio de ultra-sons, *diagonal test*, ensaio de corte directo, *grout* de cal hidráulica e consolidação.



## Abstract

The amount of decaying buildings in Portugal needing rehabilitation is very high. The old and historic masonry often presents an advanced stage of degradation due to faulty construction and lack of conservation.

Therefore, this masonry is in need of strengthening and consolidation actions in order to increase its resistance to different loads.

This work relates to one of the most current and used consolidation techniques, the masonry *grouts* injection.

The reinforcement by *grout* injection is commonly used in multi-leaf masonry since it allows greater cohesion between materials, tensions uniformity and leaf continuity.

The main objectives of the masonry consolidation by *grouts* injection technique are: occupation of voids spaces in order to increase its stiffness and strength; and the “re-establish” of the connections between leafs which has over time ceased to exist, in other words, the monolithical behaviour when applied to a vertical or horizontal load as an earthquake. Therefore the importance of shear strength analysis of the masonry's multi-leaf.

This work presents an extensive laboratory component, where injections were made in parallelepiped models to simulate the inner core of an old masonry wall.

The *grout*, consisted of hydraulic lime, superplasticizer and water, was injected into the mold with a porous medium of one of two materials, limestone or ceramic. After the curing, samples were cut into slices and the propagation velocity of ultrasonic transducers (cylindrical and conical) was analysed.

The mechanicals test used were the diagonal test and the direct shear test to determine the shear strength; finally the results of these two tests were analysed to define the proprieties.

Furthermore, to also understand the *grout*-particle of porous medium connections, some photos taken by a binocular microscope have also been evaluated.

The *grouts* injection has been shown to be very interesting and efficient technique in shear analysis, however presents better results when applied in combination with other techniques.

**Keywords:** grout injection, ultrasonic test, diagonal test, direct shear test, hydraulic lime grout, and consolidation.



# Índice

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	1
1.1 Motivação e enquadramento do tema	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Metodologia e organização da dissertação	3
<b>2. ESTADO DO CONHECIMENTO</b>	5
2.1 Injecção de <i>grout</i> em alvenarias de pano múltiplo	5
2.2 Condicionantes na injecção	7
2.3 Comportamento do <i>grout</i> no estado fresco	8
2.4 Influência da pré-molhagem no meio poroso	9
2.5 Características de alvenarias	11
2.5.1 Características de alvenarias antigas	12
2.5.2 Características de alvenarias ensaiadas em laboratório	13
2.6 Consolidação de alvenarias	14
<b>3. CAMPANHA EXPERIMENTAL</b>	19
3.1 Materiais	19
3.1.1 <i>Grout</i>	19
3.1.2 Material do meio poroso	20
3.1.3 Adjuvante superplastificante	21
3.2 Meios porosos	22
3.3 Método de injecção	23
3.4 Mistura do <i>grout</i>	24
3.5 Cura de amostras	25
3.6 Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons	25
3.6.1 Transdutores cilíndricos	27
3.6.2 Transdutores cónicos	28
3.7 Ensaio mecânicos	30
3.7.1 <i>Diagonal test</i>	30
3.7.2 Ensaio de corte directo ou <i>direct shear test</i>	35
3.8 Desenvolvimento do ensaio combinado compressão-corte (Mohr-Coulomb)	36
3.9 Avaliação de imagens captadas através da lupa binocular	41
<b>4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b>	45
4.1 Injectibilidade	45
4.2 Avaliação de ensaio ultra-sons com transdutores de diferente configuração geométrica	46
4.2.1 Influência do tipo de material	46
4.2.2 Influência do meio poroso	47

4.2.3 Influência da pré-molhagem.....	50
4.3 Nota final sobre medição velocidade de propagação de ultra-sons .....	54
4.4 Avaliação e comparação entre a injectabilidade e o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons .....	55
4.5 Avaliação entre o <i>diagonal test</i> e o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons .....	57
4.6 Avaliação entre o ensaio de corte directo e o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons ..	60
4.7 <i>Diagonal Test</i> .....	62
4.7.1 Comparação entre material.....	62
4.7.2 Comparação entre meio poroso .....	64
4.8 Ensaio de corte directo .....	66
4.8.1 Comparação entre material.....	66
4.8.2 Comparação entre meio poroso .....	68
4.9 Avaliação e comparação entre <i>diagonal test</i> e ensaio de corte directo .....	70
4.10 Avaliação e comparação entre ensaios de corte e ensaio de tracção por compressão diametral ...	72
4.11 Análise complementar do <i>diagonal test</i> para a ASTM e para a RILEM.....	74
4.11.1 Comparação com o ensaio de corte directo.....	74
4.11.2 Comparação com o ensaio de tracção por compressão diametral .....	77
4.12 Análise complementar com o uso da lupa binocular.....	81
<b>5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>85</b>
<b>6. BIBLOGRAFIA .....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>91</b>

## Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Dimensões das partículas dos meios porosos .....	8
Quadro 2.2 - Porosidade, retenção de água e superfície específica para cada meio poroso e para os materiais calcários e cerâmicos.....	9
Quadro 2.3 – Ângulo de contacto para material calcário e para material cerâmico, no estado seco e com pré-molhagem .....	11
Quadro 3.1 – Propriedades da cal hidráulica.....	20
Quadro 3.2 – Composição do <i>grout</i> .....	20
Quadro 3.3 - Dimensão de material do meio poroso.....	20
Quadro 4.1 – Injectibilidade dos meios porosos .....	46
Quadro 4.2 – Desvios padrão para as medições de velocidade de ultra-sons para material calcário e cerâmico, com ou sem presença de água e para os dois tipos de transdutores [s] .....	55
Quadro 4.3 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e os valores de injectibilidade para amostras de material calcário e cerâmico (“+” gradiente positivo e “-” gradiente negativo.....	57
Quadro 4.4 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e o <i>diagonal test</i> para amostras de material calcário e cerâmico.....	60
Quadro 4.5 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e o ensaio de corte directo para amostras de material calcário e cerâmico.....	62
Quadro 4.6 – Abertura equivalente dos meio poroso .....	65
Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios: <i>diagonal test</i> , ensaio de corte directo e ensaio de tracção por compressão diametral para amostras de material calcário e material cerâmico.....	74
Quadro A.1 – Injectibilidade dos meios porosos, com a massa do <i>grout</i> e o volume de vazios.....	91





# Índice de Figuras

Figura 2.1 - Esquema de injeção de <i>grout in situ</i> .....	6
Figura 2.2 – Ângulo de contacto .....	10
Figura 2.3 - Esquemas das secções transversais dos locais: a) Campus FCT, b) Charneca de Caparica, c) Monte de Caparica, d) Pilotos, e) Vila Nova de Caparica .....	11
Figura 2.4 - The Paterskerk em Tienen, monumento mediaval com a utilização da técnica de injeção de <i>grouts</i> .....	12
Figura 2.5- Deficiente ligação entre panos.....	13
Figura 2.6 – <i>Diagonal test</i> num murete em laboratório .....	14
Figura 2.7 – Corte transversal de alvenaria com carregamento uniforme.....	15
Figura 2.8 – Corte transversal de alvenaria com carregamento não uniforme.....	15
Figura 2.9 – Corte transversal de alvenaria com encurvamento nos panos externos .....	16
Figura 2.10 – Ruptura de alvenaria por corte .....	17
Figura 2.11 - Conectores metálicos transversais .....	17
Figura 3.1 – Imagens de agregados de material calcário, da esquerda para a direita: grosso, médio e fino (adaptado) .....	21
Figura 3.2 – Imagens de agregados de material cerâmico, da esquerda para a direita: grosso, médio e fino .....	21
Figura 3.3 – Sem plastificante (esquerda) – com plastificante (direita).....	22
Figura 3.4 – Método de injeção .....	24
Figura 3.5 - Esquema de cortes transversais .....	25
Figura 3.6 – Máquina de corte com água - <i>Jumbo</i> .....	26
Figura 3.7 – Aparelho de medição de ultra-sons do tipo <i>PUNDIT LAB</i> da <i>PROCEQ</i> com transdutores cilíndricos.....	26
Figura 3.8 – Malha de medição de velocidade de propagação de ultra-sons .....	27
Figura 3.9 – Transdutor cilíndrico.....	28
Figura 3.10 – Esquema do transdutor cilíndrico com feixe linear.....	28
Figura 3.11 – Transdutor cónico .....	29
Figura 3.12 – Esquema do transdutor cónico com feixe “ <i>Sector</i> ” .....	29
Figura 3.13 – <i>Diagonal test</i> onde é possível verificar com as cores mais quentes as tensões são inferiores [32].....	31
Figura 3.14 – Círculo de Mohr para as especificações ASTM e RILEM.....	31
Figura 3.15 – Tensões normalizadas segundo a RILEM, da esquerda para a direita: $\sigma_x$ , $\sigma_{xy}$ , $\sigma_I$ e $\sigma_{II}$ . ...	32
Figura 3.16 – “Apoios” do <i>diagonal test</i> .....	33
Figura 3.17 - <i>ZWICK/ROELL Z050</i> durante <i>diagonal test</i> .....	33
Figura 3.18 – <i>Diagonal test</i> antes e depois da ruptura .....	34

Figura 3.19 – Ruptura onde a fissura não é paralela à direcção do carregamento .....	35
Figura 3.20 – Ensaio de corte directo: figura da esquerda em ensaio e figura da direita a fatia após ensaio .....	36
Figura 3.21 – Esquerda: ensaio combinado compressão e corte e direita: ensaio de tracção por compressão diametral de uma amostra retirada de uma alvenaria .....	37
Figura 3.22 – Ensaio de triplete para análise de resistência ao corte, sem compressão .....	37
Figura 3.23 – Ruptura do ensaio de triplete, na imagem da esquerda pela junta e da direita pela diagonal .....	2
Figura 3.24 – Ensaio de triplete com compressão-corte.....	39
Figura 3.25 – Esquema de ensaio combinado compressão-corte .....	40
Figura 3.26 – Critério de Mohr-Coulomb .....	41
Figura 3.27 – Amostras no exsiccador .....	42
Figura 3.28 – Corte de excesso na amostra .....	42
Figura 3.29 – Preparação das amostras: polimento .....	42
Figura 3.30 – Lupa binocular e máquina fotográfica .....	43
Figura 4.1 - Velocidade de propagação de ultra-sons para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos.....	47
Figura 4.2 - Velocidade de propagação de ultra-sons para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos para cada meio poroso.....	48
Figura 4.3 - Velocidade de propagação de ultra-sons na fatia da base para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos para todos meios porosos .....	48
Figura 4.4 - Velocidade de propagação de ultra-sons na fatia do meio para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos para todos meios porosos .....	49
Figura 4.5 - Velocidade de propagação de ultra-sons na fatia do topo para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos para todos meios porosos .....	50
Figura 4.6 - Velocidade de propagação de ultra-sons para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos para o estado seco e molhado no meio poroso C .....	51
Figura 4.7 - Velocidade de propagação de ultra-sons para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos para o estado seco e molhado no meio poroso D .....	52
Figura 4.8 - Velocidade de propagação de ultra-sons para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos para o estado seco e molhado no meio poroso E.....	53
Figura 4.9 – Fatias de material cerâmico do meio poroso C, fatia da esquerda da base e da direita a fatia do meio.....	53
Figura 4.10 – <i>Diagonal test</i> para o material cerâmico, meio poroso C, da esquerda para a direita as fatias: base, meio e topo.....	58
Figura 4.11 - <i>Diagonal test</i> para material calcário e cerâmico para cada meio poroso para seco ou pré-molhado.....	64

Figura 4.12 – <i>Diagonal test</i> para material calcário para cada meio poroso tendo em conta cada fatia.	65
Figura 4.13– Provete inteiro de material calcário do meio poroso D com pré-molhagem.....	65
Figura 4.14 - <i>Diagonal test</i> para material cerâmico para cada meio poroso tendo em conta cada fatia	66
Figura 4.15 – Ensaio de corte directo para material calcário para cada meio poroso para seco ou pré-molhado.....	68
Figura 4.16 – Ensaio de corte directo para material calcário seco para cada meio poroso tendo em conta cada fatia .....	69
Figura 4.17 – Ensaio de corte directo para material cerâmico para cada meio poroso tendo em conta cada fatia .....	70
Figura 4.18 – <i>Diagonal test</i> e Ensaio de corte directo para material calcário para cada meio poroso para seco ou pré-molhado .....	71
Figura 4.19 – <i>Diagonal test</i> e Ensaio de corte directo para material cerâmico para cada meio poroso para seco ou pré-molhado .....	72
Figura 4.20 – Comparação do <i>diagonal test</i> com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material calcário no estado seco.....	75
Figura 4.21 – Comparação do <i>diagonal test</i> com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material calcário no estado pré-molhado .....	76
Figura 4.22 – Comparação do <i>diagonal test</i> com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material cerâmico no estado seco.....	76
Figura 4.23 – Comparação do <i>diagonal test</i> com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material cerâmico no estado pré-molhado .....	77
Figura 4.24 – Comparação do ensaio de tracção por compressão diametral com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material calcário no estado seco.....	78
Figura 4.25 – Comparação do ensaio de tracção por compressão diametral com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material calcário no estado pré-molhado.....	79
Figura 4.26 – Comparação do ensaio de tracção por compressão diametral com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material cerâmico no estado seco.....	80
Figura 4.27 – Comparação do ensaio de tracção por compressão diametral com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material cerâmico no estado pré-molhado.....	81
Figura 4.28 – Imagem captada na lupa binocular para o material cerâmico do meio poroso C.....	82
Figura 4.29 – Imagem captada na lupa binocular para o material cerâmico do meio poroso D .....	83
Figura 4.30 – Imagem captada na lupa binocular para o material calcário do meio poroso C.....	84
Figura 4.31 – Imagem captada na lupa binocular para o material calcário do meio poroso C pré-molhado .....	84



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação e enquadramento do tema

Em Portugal a necessidade de reabilitação dos edifícios é bastante elevada. Tal é notório nos grandes pólos urbanos, tais como Lisboa e Porto, onde os motivos passam sobretudo pela ineficiente concepção ou pela falta de manutenção do edificado. Devido à crise no sector da construção houve a necessidade de encontrar novos planos de negócios e a reabilitação tornou-se um grande foco no sector da construção. Para além disso, contribuíram os incentivos por parte do Governo e União Europeia e o novo Regime Excepcional de Reabilitação Urbana (RERU) que facilitaram e permitiram uma reabilitação mais económica.

Os edifícios com valor histórico necessitam de processos de consolidação para contornar a sua deterioração ao longo do tempo e uma das técnicas mais utilizada é injeção de *grouts* para consolidação de alvenarias de pano múltiplo ([1], [2] e [3]).

Os principais objectivos da consolidação de uma alvenaria através da técnica da injeção de *grouts* são: ocupação dos espaços vazios, fendas, fracturas ou fissuras com *grout*. Desta forma aumentando a sua capacidade e consequentemente o aumento da sua rigidez e resistência. Um segundo objectivo, o restabelecimento das ligações entre panos, ou seja, a importância do comportamento monolítico quando aplicado um carregamento vertical ou horizontal como um sismo [4]. Portanto a análise da resistência ao corte ao núcleo de alvenaria faz todo o sentido, pois apresenta um mecanismo de ruptura que pode provocar a ruptura parcial ou total de uma alvenaria de pano múltiplo.

Adami e Vintzileou [5] realizaram ensaios de análise de corte e obtiveram resultados que demonstram a importância das propriedades como a porosidade ou a existência de água. Mais uma vez a análise de corte é importante para perceber as características do meio poroso injectado.

Outro aspecto bastante interessante nesta técnica é o facto de não interferir na arquitectura do edificado, não alterando o aspecto externo e visível, pois interfere na parte interior da alvenaria e nas superfícies externas apenas com a malha de orifícios

A presente dissertação de mestrado integrado foi realizada em concomitância com a tese de doutoramento do Engenheiro Fernando Jorne , sobre injeção de *grout* em diferentes meios porosos para consolidação de alvenarias antigas.

Numa fase preliminar em laboratório não se realizaram as injeções em estudo, pois houve a necessidade de desenvolver e ajustar da técnica em causa.

Neste estudo utilizou-se sempre o mesmo *grout* variando o material do meio poroso (calcário ou cerâmico), a granulometria dos meios porosos e a presença ou não de água no interior do meio a injectar. O *grout* utilizado é constituído por cal hidráulica, água e superplastificante que melhora a qualidade de injeção.

O ligante escolhido foi a cal hidráulica, uma vez que este ligante apresenta melhores propriedades físicas, mecânicas e químicas [6], a compatibilidade é assegurada relativamente aos materiais existentes numa alvenaria antiga e em termos de durabilidade apresenta bastante qualidade.

É de extrema importância conhecer o funcionamento do *grout*, uma vez que o mesmo condiciona uma boa injeção. Parâmetros como a fluidez, estabilidade e retenção de água são parâmetros essenciais para uma injeção completa que permita uma uniformidade de tensões e um comportamento monolítico.

Os materiais escolhidos foram o calcário e o cerâmico, tendo sido peneirados para separação das dimensões necessárias para cada meio poroso. O material cerâmico (tijolo) antes de peneirado foi esmagado com recurso a maço para se obter as dimensões seleccionadas. Após as injeções de desenvolvimento e ajuste, realizaram-se as injeções para os dois tipos de materiais, no estado seco ou com pré-molhagem. Posteriormente à cura dos provetes, cortou-se os provetes para se obter 3 fatias que foram analisadas com o ensaio de ultra-sons com dois tipos de transdutores. Finalmente realizou-se os ensaios mecânicos *diagonal test* e ensaio de corte directo nas fatias de modo a obter a resistência mecânica e também para comparação com o ensaio ultra-sons.

O parâmetro principal de análise neste trabalho a partir dos ensaios mecânicos é a resistência ao corte, que segundo Mazzoti *et al.* [7] é o parâmetro mais importante de avaliação de uma alvenaria em situações relacionadas com a vulnerabilidade sísmica.

O presente trabalho teve uma componente laboratorial muito extensa, onde se efectuaram injeções em modelos paralelepípedicos simulando diversas permeabilidades do núcleo interior de uma parede de alvenaria antiga.

## 1.2 Objectivos

Nesta dissertação o principal objectivo é a avaliação da técnica de injeção de *grouts* a partir de uma análise da resistência ao corte do núcleo interior de uma alvenaria antiga de pano múltiplo. Pretendeu-se ainda a avaliação da compacidade a partir do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons com dois tipos de transdutores e a comparação entre os resultados da resistência mecânica a partir do *diagonal test* e do ensaio de corte directo. Complementarmente utilizou-se a lupa binocular para observar a morfologia interna.

Esta avaliação realizou-se em fatias provenientes de provetes paralelepípedicos injectados de modo a simular o núcleo interior de uma alvenaria antiga, com as seguintes características: material calcário ou material cerâmico; meio poroso; e com pré-molhagem ou seco.

## 1.3 Metodologia e organização da dissertação

Este trabalho organizou-se em seis capítulos:

O Capítulo 1 introdutório com uma explicação da motivação e enquadramento do tema, os objectivos definidos, metodologia e organização da dissertação.

No capítulo 2, apresenta-se o estado do conhecimento onde abordou-se a injeção de *grouts*, os diversos parâmetros intrínsecos tais como: as condicionantes, o comportamento no estado fresco, pré-molhagem, características de alvenarias antigas e muretes estudados em laboratório e finalmente a consolidação de alvenarias.

O capítulo 3 aborda a campanha experimental realizada em laboratório onde se apresentam os materiais, *grout*, material do meio poroso, adjuvante, meios porosos, método de injeção, mistura do *grout*, cura de amostras, ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, ensaios mecânicos e por fim a análise de imagens captadas através da lupa binocular.

No capítulo 4, tendo em conta a actividade laboratorial realizada no capítulo 3, realizou-se a análise e discussão de resultados com a avaliação de ensaio de ultra-sons com dois tipos de transdutores avaliando o tipo de material, meio poroso e pré-molhagem. Essa avaliação foi feita a partir da comparação entre o ensaio ultra-sons e os ensaios mecânicos para cada material e meio poroso. Por fim realizou-se a análise da morfologia interna a partir de imagens captadas através de uma Lupa binocular.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões do trabalho e possíveis desenvolvimentos futuros de interesse científico.





## 2. ESTADO DO CONHECIMENTO

### 2.1 Injecção de *grout* em alvenarias de pano múltiplo

A injecção de *grout* em alvenarias de pano múltiplo é uma técnica muito utilizada de reforço de alvenarias antigas, considerada uma das técnicas de consolidação estrutural com maior qualidade e eficiência em paredes antigas.

Após os sismos de 1997 em Itália, esta técnica foi redefinida devido à sua utilização sem grande qualidade, que teve como consequência a danificação de um grande número de edifícios, onde por exemplo se denotava uma injecção não uniforme ao longo da espessura da parede [8]. Esta redefinição passou pela utilização de ensaios não destrutivos como o ensaio de velocidade de propagação de ultrassons, que permitem após a injecção verificar se o *grout* conseguiu preencher a parede uniformemente.

A técnica permite que o *grout* seja injectado pelos vazios e fendas tornando a alvenaria mais compacta de forma a aumentar a sua resistência a carregamentos. Para além disso, permite que a ligação entre panos seja reformulada pois é muito comum essa ligação já não existir, e nesse caso o *grout* preenche este espaço vazio [9]. Esta ligação entre panos permite que haja uma uniformidade de tensões ao longo da secção transversal. Estando na base da qualidade das ligações, a coesão que o *grout* consegue implementar na alvenaria. Quanto melhor a coesão entre partículas melhor será a ligação entre panos.

O reforço de alvenarias antigas com recurso a Injecção de *grout* em Portugal tem sido bastante utilizado em diversos edifícios antigos, não só em edifícios de habitação como em edifícios de grande valor histórico como o Forte S. Julião da Barra em Oeiras ou o Forte da Ericeira. Também em outros países da Europa esta técnica tem sido bastante utilizada nos últimos 30 anos, onde existem diversos artigos científicos como por exemplo em Itália [10].

Apesar da técnica de consolidação apresentar resultados de grande qualidade, esta técnica é irreversível, ou seja, não é possível substituir o *grout* injectado pois este não pode ser retirado.

De acordo com Corradi *et al.* [11] em Itália desde o sismo de Friuli em 1976 a técnica de injecção de *grout* começou a ser utilizada em edifícios com dois ou três panos de alvenaria. Em 1997, devido a outro sismo que ocorreu, verificou-se que a técnica nem sempre foi utilizada de forma adequada, devido à mão-de-obra pouco qualificada e ao pouco conhecimento da constituição da alvenaria, ou seja, esta técnica de consolidação exige mão-de-obra especializada e conhecimento da mesma. Nesta altura as injecções não eram efectuadas correctamente porque muitos vazios não estavam ligados entre si que não permitiam o escoamento e ainda devido à presença de material solto no interior da alvenaria.

A Figura 2.1 apresenta o esquema do processo de injeção de *grout in situ* numa parede num caso real. A misturadora está representada pela letra “A” onde se mistura o ligante, a água e possíveis adjuvantes ou aditivos para preparação do *grout*. Neste processo é essencial a desfloculação das partículas do ligante e que esta suspensão se mantenha homogênea; “B” o colector ou reservatório; “C” a bomba de injeção que proporciona a pressão para que o *grout* seja injectado com a pressão constante; “D” o tubo flexível que leva o *grout* da bomba até à parede a injectar; “G” o barómetro de controlo de pressão com pressão constante, esta deve ser definida no caderno de encargos; “H” cada orifício tem um tubo que permite a ligação ao tubo “D” e ainda permite funcionar como tubo de purga, estes estão dispostos na alvenaria por uma malha quincôncio.

Antes de utilizar esta técnica é necessário estancar todos os orifícios ou fissuras onde haja a possibilidade de saída de *grout*.

Este processo não deve demorar demasiado tempo, pois quanto maior for o tempo de espera, maior será a floculação do *grout* e com o tempo perde propriedades como homogeneidade ou fluidez. A ordem de injeção em cada orifício da malha quincôncio deve ser executada dependentemente do estado da alvenaria, mas quando não existe nenhum impedimento o processo a utilizar é: primeiro na horizontal e depois de baixo para cima de forma a preencher todos os espaços vazios.

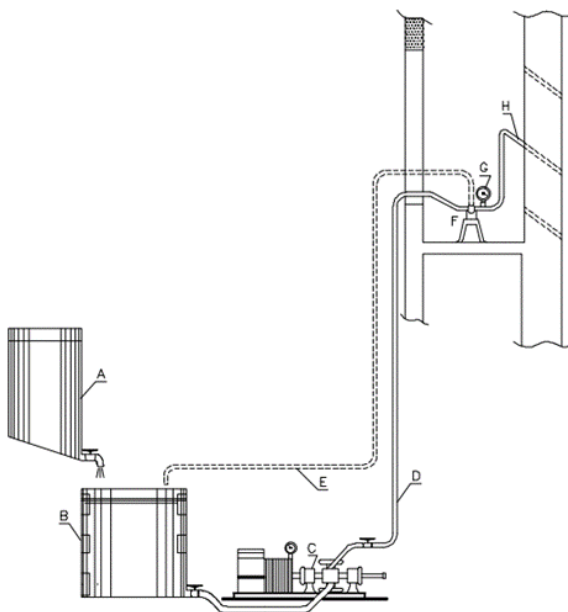


Figura 2.1 - Esquema de injeção de *grout in situ* [2]

## 2.2 Condicionantes na injeção

A injeção de *grout* pode ser avaliada a partir do parâmetro de injectabilidade, isto é, avaliando a capacidade de injeção de um *grout* escoar pelo meio poroso e ainda a capacidade de o *grout* conservar as suas propriedades.

Segundo Kalagri *et al.* [12], injectabilidade dum *grout* pode ser o parâmetro chave para uma intervenção de consolidação eficaz.

A injectabilidade depende muito do meio poroso a intervir e também das propriedades do *grout*. Jorne *et al.* [13] apresenta uma forma de quantificar a injectabilidade, onde tem em conta o volume de vazios preenchidos, enquanto que Brás *et al* [14] criou uma expressão semelhante para a avaliação da injectabilidade onde tinha em conta adicionalmente o tempo de injeção.

A Equação 1 [13] apresenta-se da seguinte forma:

$$I = \frac{\frac{m}{\rho}}{V_v} \quad \text{Equação 1}$$

Em que o quociente ( $\frac{m}{\rho}$ ) representa o volume de *grout* injectado e o divisor ( $V_v$ ) representa o volume disponível para ser preenchido de *grout* no interior do meio poroso, ou seja, o volume de vazios.

Injectabilidade de qualidade permite um preenchimento de vazios completo, que por sua vez permite uma boa coesão *grout*-partícula do meio poroso, uniformidade de tensões e continuidade de panos.

Uma das condicionantes na injeção de *grout* é a existência de espaços vazios na alvenaria por onde o *grout* possa escoar, em vazios, fendas ou fracturas. Segundo Almeida *et al.* [15] a dimensão dos vazios é maior condicionante na capacidade de injeção do que o volume de vazios, ou seja, numa alvenaria onde o volume de vazios é reduzido a técnica de injeção de *grouts* não é eficiente.

## 2.3 Comportamento do *grout* no estado fresco

O *grout* é uma suspensão aquosa que deve apresentar características reológicas controladas para que a sua estabilidade seja garantida. Problemas como a segregação e exsudação devem ser estudados aquando a injeção, pois os mesmos podem limitar a qualidade da injeção.

Antes de partir para a injeção é necessário perceber o tipo de alvenaria e as características dos materiais que constituem a mesma com o intuito de perceber que características o *grout* deve apresentar, isto para otimizar ao máximo as suas propriedades do *grout*, para que o preenchimento de vazios ou fendas ocorra de modo eficiente.

As propriedades do *grout* são afectadas por diversos parâmetros: propriedades e quantidades de ligante, relação água/ligante, superplastificante, mistura e as condições ambientais como temperatura ou humidade relativa [16].

O escoamento deve ocorrer sem grandes dificuldades, mas para isso é necessário que a tensão de cedência e viscosidade plástica apresente valores aceitáveis. A tensão de cedência é a tensão necessária para o escoamento acontecer e a viscosidade plástica é a resistência ao escoamento. Desta forma, para haver escoamento os fluidos deformam-se e para isso o valor crítico tem de ser atingido, esse valor é a tensão de corte. A viscosidade plástica está relacionada com a velocidade do escoamento [17]. Ambos os valores devem ser suficientemente baixos para o escoamento existir sem grande dificuldades e perturbações

Ainda de referir que o *grout* apresenta um comportamento Binghamiano [18] e também apresenta um escoamento de um fluido tixotrópico, pois tem a capacidade de diminuir a viscosidade ao longo do tempo a uma certa taxa de corte [19].

Os meios porosos utilizados neste trabalho permitem a simulação de diferentes permeabilidades no núcleo da alvenaria. Utilizou-se os meios porosos desenvolvidos por Jorne *et. al* [1] com diferentes quantidades de dimensões granulométricas (C, D e E) apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Dimensões das partículas dos meios porosos

Meio Poroso	Dimensão das partículas		
	0,15 - 2 mm (fina)	2 - 4,75 mm (média)	4,75 - 9,5 mm (grossa)
C	1/6	-	5/6
D	-	1	-
E	-	1/2	1/2

Importa ainda estudar os parâmetros de estabilidade e retenção de água, que são essenciais para um melhor desempenho do *grout*. A retenção de água é importante na medida em que o *grout* pode perder grande quantidade de água à medida que migra pelo meio poroso, devido à absorção por parte das paredes dos materiais [20] (nos pequenos poros existe uma grande pressão capilar – lei de Kelvin, o que provoca uma enorme absorção de água livre do *grout*) e assim perde a fluidez, mais uma vez a importância da compatibilidade dos materiais. A retenção de água depende da porosidade e do tamanho

dos poros [1], ou seja, quanto maior a porosidade maior a retenção de água. Na Quadro 2.2 é visível a grande diferença na retenção de água entre os dois materiais, como o exemplo do meio poroso C, com um valor de 2,2 % para o material calcário e 16,2 % para o material cerâmico, valores extremamente diferentes. Tal pode ser justificado pela grande quantidade de vazios com capacidade de absorver água. Assim percebe-se a importância do conhecimento deste parâmetro, uma vez que permite aferir a quantidade de água que o *grout* perde aquando a injeção [1].

Ainda a partir da Quadro 2.2 é possível verificar que a percentagem de porosidade para os meios porosos D e E é superior à do meio poroso C e por isso a injeção ocorre mais facilmente para os meios porosos D e E. Não deve-se ter em consideração apenas a porosidade, mas também a dimensão dos vazios e de que forma eles se comunicam entre si, ou seja, se apresentam canais comunicantes que permitem o *grout* chegar a todas as zonas.

A adição de um superplastificante melhora dois parâmetros, estabilidade e retenção de água, devido ao maior afastamento entre partículas e permite ainda uma melhor capacidade de injeção do *grout* [21].

O *grout* durante a mistura foi sujeito a uma taxa de corte que resultou numa separação e afastamento entre partículas. Este afastamento é superior com o uso de superplastificante, mas após esta mistura o *grout* vai perdendo as propriedades durante o tempo de repouso. Enquanto não se inicia a injeção as partículas começam a flocular, Mahaut *et al.* [22] afirma que estas alterações estruturais são reversíveis, mas apenas num curto período de tempo.

Quadro 2.2 - Porosidade, retenção de água e superfície específica para cada meio poroso e para os materiais calcários e cerâmicos [13]

Meio Poroso	C		D		E	
Material	Calcário	Cerâmico	Calcário	Cerâmico	Calcário	Cerâmico
Porosidade (%)	44,6	51,5	50,4	56,6	48,4	55,4
Retenção de água (%)	2,2	16,2	2,2	14,3	1,5	12,5
Superfície específica (mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> )	3,17	3,38	2,86	2,63	2,02	1,72

## 2.4 Influência da pré-molhagem no meio poroso

De modo a perceber de que forma a presença de água influencia a capacidade de injeção de um *grout* e as propriedades da alvenaria, utilizou-se a pré-molhagem *a priori* da injeção de *grouts*. A molhabilidade está inteiramente relacionada com a capacidade de retenção de água e ainda com a fluidez do *grout*, pois a perda de água livre do *grout* pode contribuir para diminuição da capacidade de injeção [23].

As alvenarias antigas de pano múltiplo apresentam uma espessura elevada, principalmente no núcleo interior, particularmente estudado neste trabalho, onde apresenta dificuldade de evaporação de água. As superfícies exteriores de alvenaria podem estar imperfeitas, permitindo a entrada de água.

Outra forma importante de entrada da água é a partir do terreno, dado que estas alvenarias não apresentam cuidados a nível de corte hídrico, onde também é agravado pela elevada espessura da alvenaria que permite o aumento da capacidade de capilaridade, ou seja, a altura que água consegue antigir é elevada [24].

A pré-molhagem aumenta a quantidade de água no meio poroso, mas após a cura este meio poroso apresenta vazios e reduzida compacidade quando comparado com uma amostra sem pré-molhagem.

Um dos aspectos importantes na avaliação da pré-molhagem passa pela forma como o líquido molha, ou seja, como funcionam as forças de atracção entre as paredes dos poros e do líquido, que pode ser simplificado pelo ângulo de contacto (Figura 2.2), que segundo Henriques o ângulo de contacto é a “*inclinação da tangente a uma gota do líquido sobre a superfície em causa*” [25]. Quando o ângulo de contacto é menor que  $90^\circ$  significa que as forças de atracção do líquido em relação às paredes do poro são superiores às forças de atracção entre o líquido e o ar, quando o ângulo de contacto é superior a  $90^\circ$  acontece o contrário. No primeiro caso o material é chamado como hidrófilo e no segundo caso como hidrófobo, ou seja, para melhorar a capacidade de injeccção é necessário que o ângulo de contacto ser o maior possível.

Segundo Baltazar *et al.* [23], o elevado ângulo de contacto indica baixa molhabilidade, ou seja, para que haja menor perda de água livre do *grout* é fundamental que o ângulo de contacto seja elevado para que o valor de injectibilidade tenha qualidade. Por outras palavras, a pré-molhagem aumenta o ângulo de contacto e por sua vez diminui a sucção dos poros, levando assim a uma melhor capacidade de injeccção.

De referir uma componente do *grout* que é possível relacionar com ângulo de contacto, é o superplastificante com a sua propriedade de repelência, pois permite aumentar o ângulo de contacto e assim contribuir para a menor molhabilidade e perda de água livre.

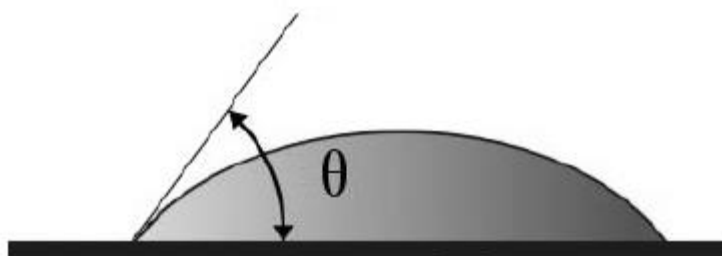


Figura 2.2 – Ângulo de Contacto [25]

Apesar da pré-molhagem aumentar o ângulo de contacto como o Quadro 2.3 mostra, a pré-molhagem aumenta a quantidade de vazios existente entre partículas. O *grout* não consegue preencher todas as zonas devido à presença de água, que durante o tempo de cura evapora deixando espaços vazios. Estes vazios provocam uma diminuição das ligações entre o *grout* e o agregado.

Quadro 2.3 – Ângulo de contacto para material calcário e para material cerâmico, no estado seco e com pré-molhagem [1]

MP	Presença de água	Ângulo de contacto $\theta$ (°)
Material calcário	Seco	48
	Pré-molhado	76
Material cerâmico	Seco	35
	Pré-molhado	54

## 2.5 Características de alvenarias

As alvenarias em estudo são alvenarias de pano múltiplo. Um exemplo de uma alvenaria de pano múltiplo usual é a alvenaria com três panos, dois panos exteriores constituídos por blocos de pedra (aparelhada ou ordinária) ou tijolo e uma argamassa (normalmente de cal) e um pano interior a que se dá o nome de núcleo interior constituído por material diverso. A Figura 2.3 apresenta vários exemplos de alvenarias de pano múltiplo, onde também apresenta um esquema de cores correspondentes aos materiais ou a vazios.

De acordo com Valluzi *et al.* [26] a injeção depende do tipo de parede, dos materiais, das dimensões e dos carregamentos aplicados. Estas alvenarias podem existir em edifícios de habitação ou edifícios de valor patrimonial, através de uma parede resistente de um edifício ou uma muralha de um forte.

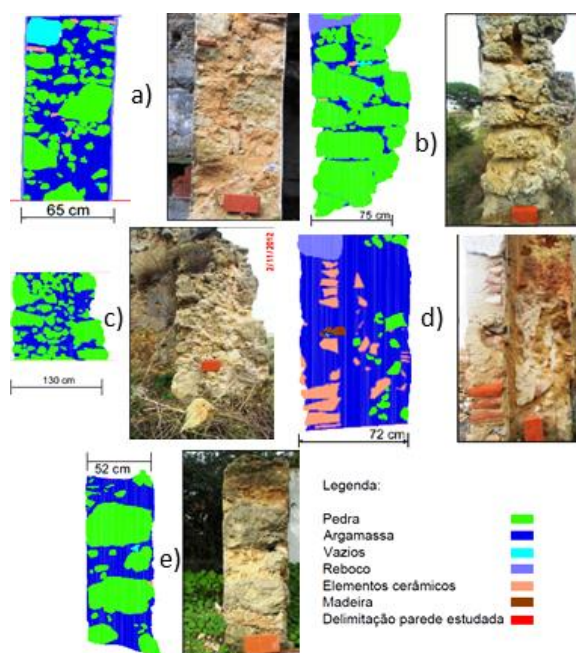


Figura 2.3 - Esquemas das secções transversais dos locais: a) Campus FCT, b) Charneca de Caparica, c) Monte de Caparica, d) Pilotos, e) Vila Nova de Caparica [27]

## 2.5.1 Características de alvenarias antigas

As alvenarias antigas ou históricas são alvenarias de pano múltiplo, como explicitado anteriormente. Este trabalho avalia principalmente as características do núcleo interior, pois este tem um grande relevo no comportamento da alvenaria como se comproverá no capítulo 2.6. Um exemplo de aplicação da técnica de injeção de *grouts* é um monumento medieval em Tienen [2], onde foi utilizado esta técnica para preservação do monumento (Figura 2.4).



Figura 2.4 - The Paterskerk em Tienen, monumento medieval com a utilização da técnica de injeção de *grouts* [2]

Este tipo de alvenarias apresenta essencialmente as seguintes características: materiais de origens e características diversas, fraca ligação entre panos, fraca ligação de juntas entre blocos, dimensão transversal elevada, peso elevado, argamassa com fraca resistência mecânica, elevada porosidade, possível presença de água, possível revestimento e elevada resistência à compressão [27].

Os materiais utilizados neste tipo de alvenarias nos paramentos exteriores são principalmente pedras de forma irregular ou prismática ou blocos de material cerâmico, enquanto os materiais de enchimento são diversos e dependem da localização da obra, ou seja, os materiais utilizados na alvenaria estavam nas proximidades da obra.

As alvenarias que necessitam de intervenção de reforço com a técnica de injeção de *grouts* constituem alvenarias com necessidades susceptíveis a carregamentos excessivos ou de incremento de comportamento monolítico, com o restabelecimento de ligações entre panos. Quando a qualidade de ligação entre panos não é garantida, estes panos são susceptíveis a ações de corte devido à fraca resistência à tracção [11]. Um exemplo da ligação entre panos que não está garantida é a Figura 2.5, onde é bem visível a deficiente ligação entre panos.

Nestas alvenarias é essencial o estudo da vulnerabilidade sísmica para os mais diversos tipos de paredes como em torres [28], igrejas [29], palácios [30] e edifícios em geral [31].





Figura 2.5- Deficiente ligação entre panos [11]

### 2.5.2 Características de alvenarias ensaiadas em laboratório

De referir ainda que este tipo de alvenaria pode ser testado em laboratório a partir de muretes. Estes muretes para serem testados numa primeira fase, são ensaiados sem qualquer técnica de consolidação como a injeção de *grouts* e numa segunda fase, os muretes com as mesmas características mas com a utilização da consolidação de injeção de *grouts*. Os ensaios utilizados para avaliação das propriedades do murete mais utilizados são: o ensaio de compressão, o *diagonal test* (Figura 2.6) ou o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons.

Nos diversos artigos de Kalali *et al.* [32], Mazzotti *et al.* [7] ou Milosevic *et al.* [33] têm sido estudados em alvenaria de pedra aparelhada ou de tijolos, onde as juntas entre blocos são regulares com argamassa entre dois blocos, neste estudo estas juntas existentes são de forma irregular e com menor dimensão entre duas ou mais partículas do meio poroso com o *grout* a “substituir” a argamassa, assim pode-se afirmar que o seu comportamento é muito semelhante.

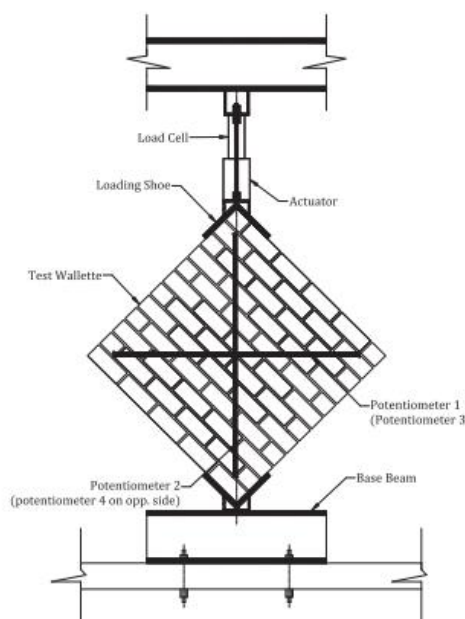


Figura 2.6 – *Diagonal test* num murete em laboratório [34]

## 2.6 Consolidação de alvenarias

As alvenarias antigas de pano múltiplo muitas vezes são constituídas por 3 panos, panos externos em pedra ou tijolo e um núcleo interior constituído por material diverso. Existem diversos tipos de processo de consolidação de alvenarias, mas para todos é necessário um prévio conhecimento de todas as características do elemento como materiais, processos construtivos ou comportamento face a carregamentos.

As alvenarias de pano múltiplo apresentam características vulneráveis a carregamentos verticais e horizontais devido à presença de vazios e materiais fracos ou com relativa deterioração [26]. Um dos aspectos importantes a referir em alvenarias antigas é a sua deterioração, pois pode diminuir a capacidade de carga ou afectar o comportamento estrutural. Uma correcta consolidação pode ser condicionada por aspectos relacionados com a forma como se comporta o *grout*, e um desses aspectos é a fluidez que condiciona a capacidade de injeção.

As alvenarias estão sujeitas a diversos tipos de carregamentos, além da compressão vertical, as alvenarias estão também sujeitas a tensões de tracção entre pedras e alvenaria que podem causar fissuras nas rochas e nas ligações [35].

Caso haja um sismo a alvenaria está sujeita a outro tipo de carregamentos, e existem dois tipos de mecanismos de ruptura que são chamados: “*in-plane shear and out-of-plane bending*”, isto é, dentro do plano por corte e fora do plano por flexão [32]. Neste trabalho apenas é estudado a primeira situação para ruptura por corte para o núcleo interior.

Analisando os carregamentos numa alvenaria real em secção transversal pode-se visualizar um carregamento uniforme em toda a secção, ou seja, nos diversos planos este carregamento é constante, como mostra a Figura 2.7.

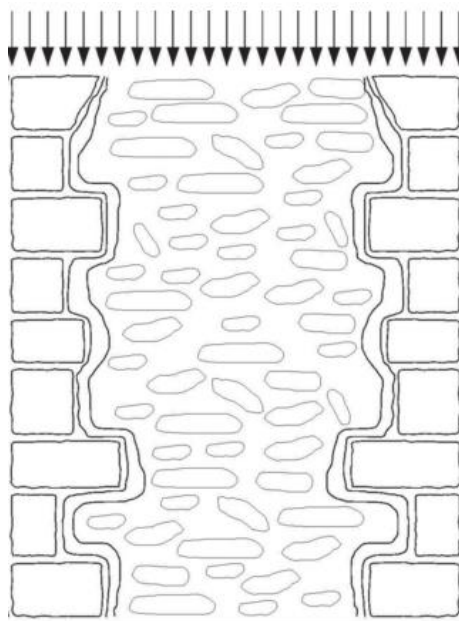


Figura 2.7 – Corte transversal de alvenaria com carregamento uniforme [36]  
(adaptado)

Como a rigidez dos paramentos externos é superior à rigidez do núcleo, permite o encurtamento do núcleo que por sua vez provoca um carregamento superior nos paramentos externos como representado na Figura 2.8.

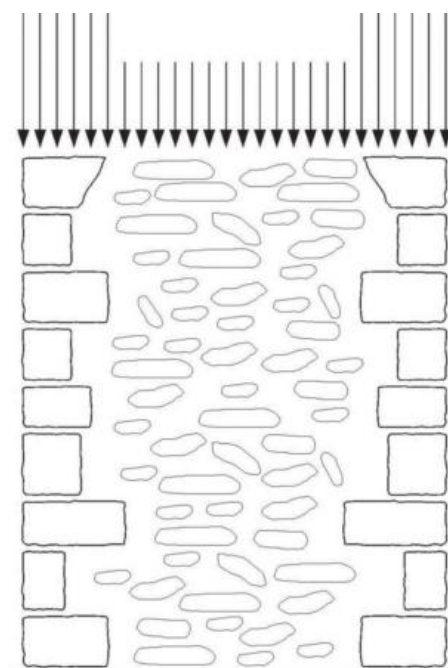


Figura 2.8 – Corte transversal de alvenaria com carregamento não uniforme [36]

Este maior carregamento nos paramentos externos provoca o encurvamento, formando um efeito "barriga" em que a meia altura a espessura é superior em relação à base e ao topo. Essa ligação sendo fraca ou com o tempo deteriorou-se, causando o encurvamento e o destacamento dos panos externos com o núcleo, consequentemente estabelecer uma inversão de tensões e provocar um maior carregamento no núcleo interior como mostra a Figura 2.9.

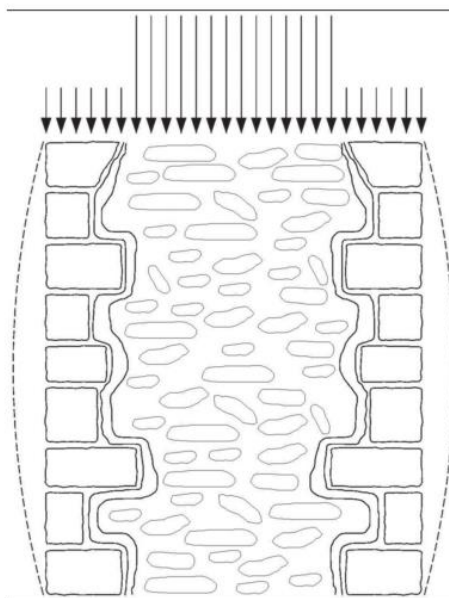


Figura 2.9 – Corte transversal de alvenaria com encurvamento nos panos externos [36]

O núcleo interior constituído por material diverso resiste pouco a esta carga extraordinária e pode provocar a ruptura por corte pelo paramento mais débil como mostra a Figura 2.10. Então clarifica-se a importância do conhecimento dos parâmetros de ruptura por corte neste tipo de alvenarias, onde este estudo incide com grande relevo. Ainda de referir que para além da importância do estudo em carregamento vertical existe a possibilidade do carregamento horizontal como um sismo que é em tudo semelhante ao que acontece no carregamento vertical [36].

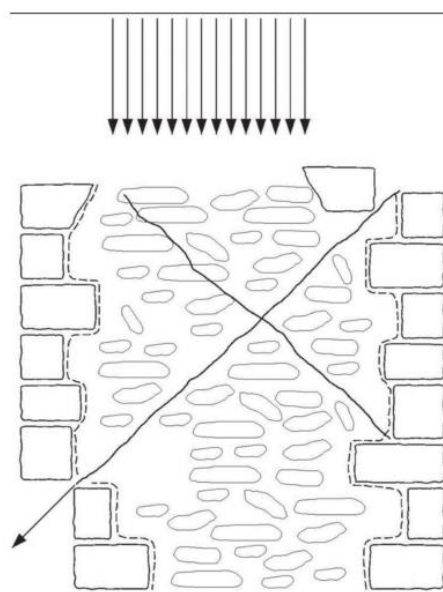


Figura 2.10 – Ruptura de alvenaria por corte [36]

Nestes casos em que a ligação entre panos degrada-se, a consolidação é essencial, a injeção de *grout* é uma das técnicas de consolidação com maior utilidade pois permite o preenchimento de vazios, aumentando a rigidez do núcleo e criando uma nova ligação entre panos. Para além de eficiente, esta técnica permite em alvenarias antigas a manutenção do seu aspecto original sem afectar a sua imagem estética.

Esta técnica permite o aumento da rigidez do núcleo interior e melhorando o seu comportamento monolítico, assim apresenta boa resposta a carregamentos que podem provocar esforços de corte. Apesar desta técnica não permite a resistência a todo o tipo de carregamentos, como é o caso dum carregamento que provoque a rotação do corpo rígido, neste caso deveria ser utilizado a técnica de injeção de *grouts* em conjunto com outras técnicas, como a utilização de conectores metálicos transversais representado na Figura 2.11[37].

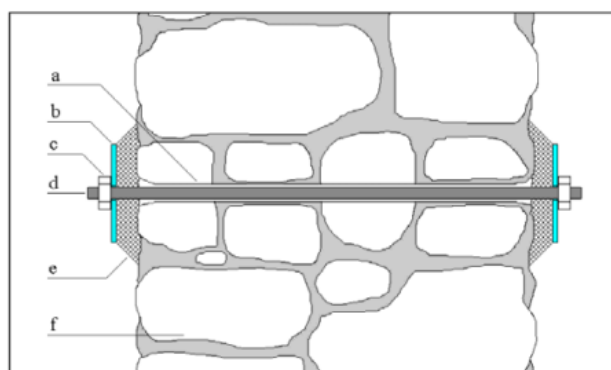


Figura 2.11 - Conectores metálicos transversais [37]

Como base no processo de consolidação, Van Germert [36] estabelece os diferentes princípios de reforço e consolidação:

- preenchimentos de orifícios e fissuras;
- reforço da rigidez do núcleo;
- redução do encurvamento dos paramentos externos;
- reforço da ligação entre panos e reforço da resistência do núcleo;
- implementação de homogeneidade de tensões no núcleo interior.

A distribuição do *grout* neste tipo de alvenarias deve ser uniforme e proporcionar assim uma coesão entre a argamassa e as pedras.

A principal característica do *grout* não está relacionada com a resistência à compressão mas sim com a ligação entre o *grout* e as partículas do meio poroso de forma a aumentar a coesividade do meio injectado, outro aspecto importante é a sua resistência ao corte. Consequentemente limitando o movimento de deformação horizontal dos panos, é impedido ou reduzido a abertura de fissuras horizontais que podem causar a sua ruptura [36].

A consolidação utilizada por Valluzzi [26] em muretes em laboratório com a técnica de injeção de *grout* melhorou em cerca de 50% a capacidade de carga de uns painéis de alvenaria de pedra, o que mostra a grande qualidade de incremento de resistência.

A consolidação deste tipo de alvenarias é essencial para o comportamento de todo o tipo de carregamentos, onde o comportamento monolítico apresenta um aspecto de grande importância que só pode ser garantido quando as ligações entre panos apresentam qualidade.

A injeção de *grouts* apresenta-se como técnica de consolidação não contínua, isto é, não uniforme pois o *grout* preenche onde existem vazios disponíveis a serem preenchidos. Assim pode-se concluir que a técnica de injeção de *grouts* apresenta-se como uma técnica ineficaz quando o volume de vazios é reduzido pois não consegue aumentar a sua rigidez e por sua vez a sua resistência global da alvenaria, devido ao reduzido espaço para preenchimento do *grout*.

## 3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Grout

O *grout* é uma suspensão aquosa constituída por água, ligante, adjuvantes como superplastificante e possíveis adições como sílica de fumo. O *grout* escolhido é constituído por água, ligante e superplastificante.

Seleccção de *grout* segundo Valluzzi *et al.* [26], deve ser efectuada da seguinte forma:

1. Caracterização da alvenaria, conhecimento das propriedades da argamassa, blocos, material existente no núcleo interior, dimensões da parede ou percentagem de vazios;
2. Caracterização química, física e mecânica a partir de ensaios realizados em laboratório com os modelos;
3. Determinação de parâmetros de reologia e outras propriedades necessárias para a selecção do *grout*;
4. Injecções simuladas em laboratório com material sólido semelhante ao caracterizado, para conhecimento de propriedades como a injectabilidade;
5. Realização de ensaios mecânicos em laboratório dos modelos injectados.

Este estudo prende-se principalmente nos pontos quatro e cinco, mas em estudos anteriores realizaram-se os pontos anteriores ([1] e [38]).

O ligante escolhido é a cal hidráulica HL5 (2014) da Secil-Martingança pois proporciona uma compatibilidade física, química e mecânica com os materiais existentes numa alvenaria antiga [9] e ainda proporciona uma boa durabilidade [11], as propriedades da cal hidráulica estão representadas no Quadro 3.1.

A utilização de cimento neste tipo de alvenarias não é aconselhável devido às incompatibilidades físicas e químicas.

Tendo em conta estas compatibilidades a escolha ideal seria a cal aérea, mas esta necessita de dióxido de carbono para endurecer, ou seja, necessita de CO<sub>2</sub> para a carbonatação. Onde existe dificuldade de contacto com o ar devido à elevada espessura que este tipo de alvenaria apresenta.

Quadro 3.1 – Propriedades da cal hidráulica

Tensão de Compressão aos 7 dias (MPa) > 2,0		
Finura	90 µm	15,00%
	200 µm	2,00%
Tempo de presa	Início	> 1h
	Fim	< 15h
Expansibilidade	< 2,0 mm	
Cal livre	3,89%	
Massa volúmica	2,85 g/cm <sup>3</sup>	
Superfície específica	9400 cm <sup>2</sup> /g	

O *grout* na sua constituição tem ainda um adjuvante, o superplastificante *BASF Glenium Sky 617* que será caracterizado ao nível de objectivo e propriedades no ponto 3.1.3.

A composição do *grout* escolhido é a seguinte:

Quadro 3.2 – Composição do *grout* [13]

Ligante	W/b	SP	% SP
HL5	0,5	<i>Glenium Sky 617 (BASF)</i>	1,2

### 3.1.2 Material do meio poroso

Os material do meio poroso utilizados foram o material calcário e o material cerâmico, ambos foram lavados e posteriormente levados à estufa. Após a secagem foram peneirados para obter os três intervalos de dimensões pretendidas, explicitadas no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Dimensão de material do meio poroso [13]

Fino	Médio	Grosso
0.15–2 mm	2–4.75 mm	4.75–9.5 mm

### Material Calcário

O agregado utilizado é um material obtido a partir da britagem de pedra de origem calcária, este material pode ser chamado como brita e tem como principais propriedades a elevada massa volúmica, reduzida porosidade e elevada velocidade de propagação de ultra-sons (Figura 3.1).





Figura 3.1 – Imagens de agregados de material calcário, da esquerda para a direita: grosso, médio e fino [1] (adaptado)

## Material Cerâmico

Este material foi obtido a partir do esmagamento de tijolo furado de obra corrente, com objectivo de reproduzir as dimensões pretendidas (Figura 3.2). As propriedades do material comparativamente com o material calcário demonstram uma massa volúmica inferior, percentagem de porosidade muito superior e menor velocidade de propagação de ultra-sons.



Figura 3.2 – Imagens de agregados de material cerâmico, da esquerda para a direita: grosso, médio e fino [1] (adaptado)

### 3.1.3 Adjuvante superplastificante

O superplastificante é considerado segundo a norma NP EN 934-2 um adjuvante, que permite diminuir quantidade de água e aumentar a trabalhabilidade de um betão ou neste caso um *grout*.

O superplastificante submete um factor repulsor entre partículas de ligante, afastando-se entre si, provocando uma diminuição do fenómeno de floculação e de segregação, por outras palavras a superfície das partículas de ligante são revestidas por superplastificante, que provoca uma repulsão entre partículas, este fenómeno este demonstrado na Figura 3.3.

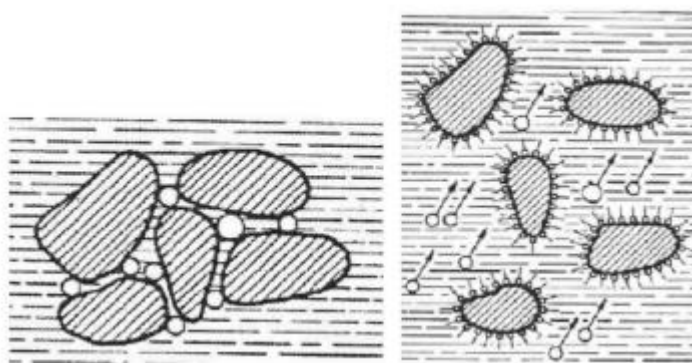


Figura 3.3 – Sem plastificante (esquerda) – com plastificante (direita) [39]

Baltazar *et al.* [40] estudou o tipo e dosagem de superplastificante, onde seleccionou um superplastificante de terceira geração, o *BASF Glenium Sky 617*, que permite dupla repulsão: repulsão estérica e electroestática. Este superplastificante foi utilizado em trabalhos anteriores ([13], [41] e [42]).

O uso deste adjuvante permite uma melhoria a nível reológico, pois reduz a viscosidade e a tensão de cedência do *grout*, factores importantes para a eficácia do escoamento do *grout* e da qualidade da injectibilidade.

O uso do superplastificante permite reduzir a quantidade de água de 55 % para 50 % devido à sua propriedade de aumentar a fluidez do *grout*. Segundo Gołaszewski [43], menor W/b provoca o aumento da resistência e da durabilidade, mantendo a trabalhabilidade. Baltazar *et al.* [40] afirma ainda que o uso de superplastificante melhora a resistência à compressão.

É interessante referir que o superplastificante aumenta o ângulo de contacto resultando numa menor molhagem e maior quantidade de água livre que por sua vez permite uma maior penetração do *grout* na alvenaria [23].

## 3.2 Meios porosos

O núcleo de uma alvenaria antiga de pano múltiplo pode ser constituído por material diverso, com dimensões e origens dispersas. Então foram criados cinco Meios Porosos com diferentes quantidades de dimensões granulométricas (A, B, C, D e E) para simulação de diferentes permeabilidades no núcleo da alvenaria [1]. Estes meios porosos foram seleccionados a partir de diversos parâmetros como dimensão, quantidade e distribuição de vazios [3].

Como verificado por Coelho [41], quando os meios porosos A e B são injectados a taxa de sucesso é muito reduzida e por isso não é possível a obtenção de provetes totalmente injectados, por essa razão nesta dissertação são utilizados os meios porosos C, D e E. Também em sintonia com Coelho utilizou-se para cada meio poroso a pré-molhagem com o intuito de comparar com a amostra seca, para

percepção da influência em caso real de uma alvenaria a possível existência de humidade e ainda a possível utilização da pré-molhagem na injeção de *grouts* que pode trazer benefícios.

As dimensões das partículas e quantidades para cada meio poroso C, D e E estão representadas no Quadro 2.1.

### 3.3 Método de injeção

O método de injeção utilizado neste estudo teve como base os trabalhos de Jorne *et al.* [1], de acordo com a norma ASTM C943 e como outros autores ([44], [45] e [14]).

A simulação da injeção do núcleo interior em modelos de secção quadrangular com 150 mm de lado e 300 mm de altura, apesar dos estudos realizados anteriormente utilizarem sempre modelos circulares, foi escolhida esta configuração pois os parâmetros mecânicos a obter necessitam de um modelo de secção quadrangular. Os moldes foram projectados e desenhados de modo a utilizar as mesmas bases, 4 moldes de madeira que apresentam uma tecnologia para a desconfragem, a Figura 3.4 à esquerda mostra o modelo com uma base e tampa de acrílico e o molde de madeira de secção quadrática.

A injeção de *grout* nestes modelos ocorreu sobre pressão obtida por uma panela de ar comprimido, a pressão de 1 bar e a temperatura e humidade relativa controladas (Figura 3.4 do lado direito). A pressão escolhida foi a pressão de 1 bar porque segundo Guerreiro [42] a pressões mais baixas o *grout* apresenta-se mais estável, mas não são diferenças muito relevantes.

Os meios porosos eram constituídos por material calcário e por material cerâmico e estes foram submetidos a injeção no estado seco e no estado molhado de modo a ter outro parâmetro de variação.

Na base do molde utilizou-se uma camada de material grosseiro para diminuir a obstrução inicial passível de acontecer, Jorne *et al.* [1] começou por utilizar esta “camada de enrocamento” após perceber que muitas das vezes quando a injeção não ocorria como previsto o motivo passava pela dificuldade de penetração no local inicial de injeção.



Figura 3.4 – Método de injeção

### 3.4 Mistura do *grout*

A mistura do *grout* implica um cuidado redobrado para que a taxa de corte aplicada em todos os *grouts* seja semelhante. A técnica de mistura utilizada neste estudo foi uma técnica desenvolvida por Baltazar *et al.* [38], onde em primeiro lugar introduzia-se toda a quantidade de cal hidráulica e uma proporção de água no recipiente, misturou-se durante 10 minutos, posteriormente durante 30 segundos introduz-se a segunda proporção de água e o superplastificante e finalmente a mistura com mais 3 minutos. Após a mistura verifica-se o estado do *grout*, já que a existência de grânulos era um impedimento para a utilização desse *grout*, em seguida sem tempo de espera a injeção é efectuada. Este *grout* preparado não deve aguardar muito tempo pois o *grout* vai perdendo propriedades ao longo do tempo, tal como a fluidez e a estabilidade que por sua vez condicionam a injectabilidade.

### 3.5 Cura de amostras

As amostras posteriores à data de injeção, aguardam durante 45 dias numa sala condicionada com 20 °C de temperatura e 65 % de humidade relativa.

Após a cura estes provetes foram cortados, com disco e com a presença de água, em 3 fatias (Base, Meio e Topo) que durante 24 horas permaneceram numa estufa a 85 °C, de forma a evaporar a água que absorvera no corte e *a posteriori* realizou-se de ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons.

### 3.6 Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

O ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons mede o tempo que uma onda elástica demora a percorrer uma determinada distância entre o transdutor emissor e o transdutor receptor.

A velocidade da onda depende portanto das propriedades elásticas do meio, assim, quanto maior for a massa volúmica do meio e menor quantidade de interfaces, maior será a velocidade de propagação de ultra-sons. Determina-se assim a variação das características do material a partir da variação das velocidades de ultra-sons ([8], [46] e [47]).

Neste estudo no ensaio de ultra-sons utilizou-se os mesmos princípios utilizados por Coelho [41] e Jorne *et al.* [1] com algumas alterações devido a parâmetros geométricos evidentes. De referir ainda que o ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM C597-02 [48].

Após uma cura de 45 dias cortaram-se os provetes em 3 fatias (Base, Meio e Topo). A base foi cortada em 3 cm de forma a remover a “camada de enrocamento” e a partir daí cortou-se as fatias com 8 cm, como apresenta a Figura 3.5. Este corte foi realizado com recurso a uma máquina de corte *Jumbo* com água, como apresenta a Figura 3.6. A secagem das fatias foi feita estufa a 85 °C durante 24 horas.

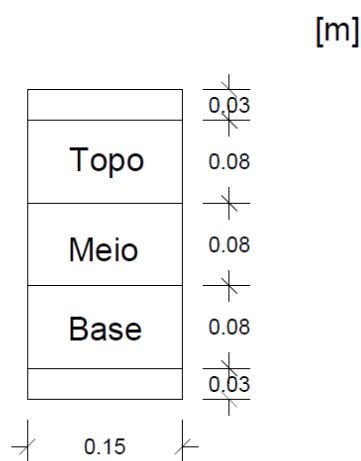


Figura 3.5 - Esquema de cortes transversais



Figura 3.6 – Máquina de corte com água - *Jumbo*

O equipamento utilizado para medição da velocidade de propagação de ultra-sons foi um equipamento do tipo *PUNDIT LAB* da *PROCEQ* (Figura 3.7), onde foram utilizados dois tipos de transdutores cónicos e cilíndricos. Em estudos anteriores ([41] e [42]) apenas foram utilizados transdutores cónicos devido às configurações geométricas cilíndricas das amostras, neste estudo no capítulo 4.1 será analisado os resultados de modo a perceber quais apresentam resultados mais fidedignos. De referir que na ligação entre os transdutores e o elemento em análise utilizou-se sempre um gel para conferir uma ligação perfeita sem espaços de ar ou imperfeições.

O aparelho apenas mede o tempo em microsegundos que a onda demora do transdutor emissor até ao transdutor receptor, registando o valor, *a posteriori* calculou-se a partir da distância entre os dois pontos de medição o tempo medido assim é possível saber a velocidade que a onda percorrem o troço.



Figura 3.7 – Aparelho de medição de ultra-sons do tipo *PUNDIT LAB* da *PROCEQ* com transdutores cilíndricos

A frequência do aparelho de 54 KHz não foi alterada, a amplitude máxima 100x, o sinal emitido de 500V. Segundo Coelho [41] os melhores resultados ocorreram para uma amplitude máxima de 100x

e um sinal emitido de 500V visto que este último diminui a extensão do campo próximo, por isso neste estudo decidiu-se utilizar estes valores.

A malha de medição de velocidade de ultra-sons realizada a meia altura e com 6 direcções (duas com 15 cm e quatro com 16,6 cm) representada na Figura 3.8, para cada direcção medida 3 vezes.

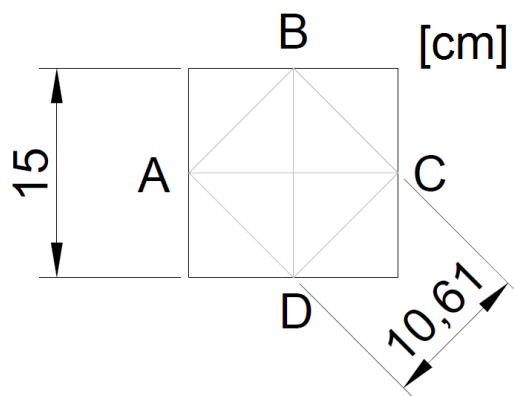


Figura 3.8 – Malha de medição de velocidade de propagação de ultra-sons

Os transdutores cilíndricos e cónicos foram utilizados com intuito de perceber quais apresentam melhores resultados.

O estudo em pormenor da propagação de ultra-sons não é um aspecto em foco neste trabalho, mas há propriedades que devem ser estudadas, a atenuação acústica que representa perda ou diminuição de características iniciais de uma onda acústica que pode acontecer de duas formas: absorção relativa a perdas do meio ou dispersão por perdas em fronteiras. No caso em estudo é mais significativo o parâmetro de atenuação por dispersão, pois apresenta maior relevo em pequenos volumes como é o caso. Outra propriedade que importa referir é o conceito de campo próximo que se define como a “zona próxima do cristal onde ocorrem interferências ondulatórias” segundo Coelho [41], ou seja, nesta zona a avaliação da morfologia da amostra não apresenta muita qualidade. Enquanto que o campo longínquo é a zona imediatamente a seguir ao campo próximo onde a avaliação apresenta resultados correctos.

### 3.6.1 Transdutores cilíndricos

Os transdutores cilíndricos permitem a medição numa superfície plana, a configuração do transdutor está representada na Figura 3.9. Este transdutor emite um feixe em túnel com um feixe menos expansivo do que o transdutor emissor cónico, isto é, à medida que distância aumenta a área de incidência aumenta.





Figura 3.9 – Transdutor cilíndrico

O sinal emitido pelo transdutor cilíndrico é perpendicular à superfície em contacto com a amostra, ou seja, as ondas são emitas paralelamente entre si. Apresentam uma matriz linear como representado na Figura 3.10 [49]. Este transdutor apresenta uma boa resolução a nível do campo próximo, mas quando a superfície é imperfeita ou curvilínea não apresenta resultados de qualidade.

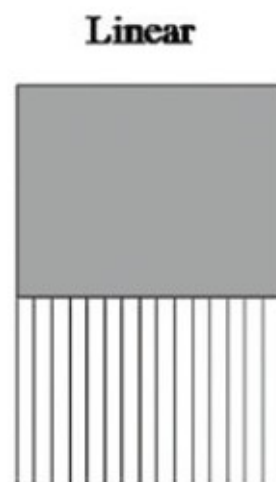


Figura 3.10 – Esquema do transdutor cilíndrico com feixe linear

### 3.6.2 Transdutores cónicos

Neste sub-capítulo apresenta-se a análise da compacidade dos modelos injectados em laboratório em moldes cilíndricos, através do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons com transdutores cónicos.

O transdutor cónico utilizado está representado na Figura 3.11, este transdutor cónico emite um feixe com forma triangular (ou “*sector*”) representado na Figura 3.12, isto é, tem um feixe mais



expansivo que o cilíndrico e à medida que a distância aumenta a área de incidência aumenta. Enquanto que o transdutor cilíndrico apresenta uma boa medição no campo próximo, este apresenta uma medição no campo próximo de baixa resolução, mas com penetração mais longínqua [49].



Figura 3.11 – Transdutor cónico

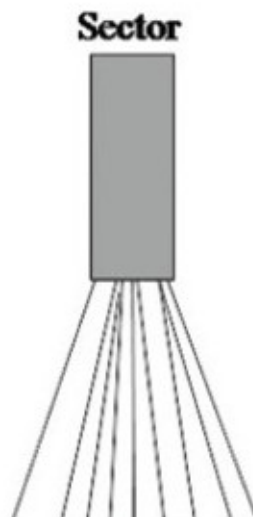


Figura 3.12 – Esquema do transdutor cónico com feixe “sector” [49]

## 3.7 Ensaios mecânicos

### 3.7.1 *Diagonal test*

O ensaio de compressão diagonal ou *diagonal test* é utilizado especialmente em alvenarias de tijolo ou pedra, como tal, os trabalhos existentes são para alvenarias e as especificações também são para elementos de dimensão superior. As amostras não são pequenos muretes, pois apenas se estuda o núcleo interior de uma alvenaria de pano múltiplo.

Durante um sismo as alvenarias estão sujeitas, para além de carregamentos verticais do seu peso ou de sobrecarga, a carregamentos laterais, e por isso torna-se necessário o estudo do parâmetro de tensão de corte. Então o ensaio *diagonal test* vem complementar este estudo.

No estudo do *diagonal test* existem duas especificações: norma ASTM e a especificação RILEM, a ASTM E 519 – 02 (2002) [50] e RILEM TC-76 LUM (1994) [51], respetivamente. Estas duas especificações apresentam abordagens diferentes dos parâmetros mecânicos, onde a principal divergência é o campo de tensões no interior da amostra [52].

A ASTM apresenta uma norma onde assume que o *diagonal test* inicialmente tem uma tensão normal nula e provoca uma tensão de corte uniforme ao longo da diagonal (igual às tensões principais):

$$\sigma_I = \sigma_{III} = \sigma_{xy} = 0.707 \frac{P}{A} \quad \text{Equação 2}$$

Onde  $P$  a força diagonal aplicada e  $A$  a área do painel.

A RILEM considera que a compressão diagonal provoca uma tensão de corte não uniforme, pois assume uma tensão principal máxima de tracção no centro amostra, como se visualisa na Figura 3.13 que no centro as tensões são superiores:

$$\sigma_x = \sigma_y = -0.58 \frac{P}{A} \quad \text{Equação 3}$$

A tensão de corte é dada pela seguinte expressão:

$$\sigma_{xy} = 1.1 \frac{P}{A} \quad \text{Equação 4}$$

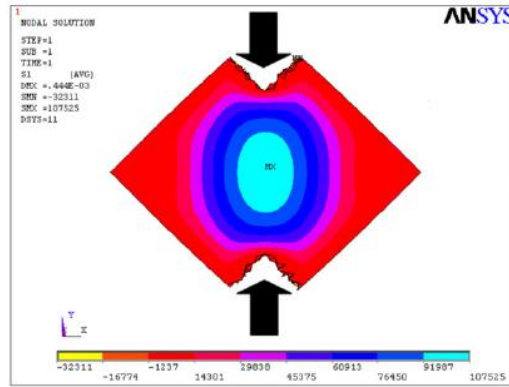


Figura 3.13 – *Diagonal test* onde é possível verificar com as cores mais quentes as tensões são inferiores [32]

Como o círculo de Mohr apresenta o seu centro na origem do eixo cartesiano para norma ASTM, onde as tensões principais são iguais à tensão de corte, como mostra a Figura 3.14 com o círculo a tracejado.

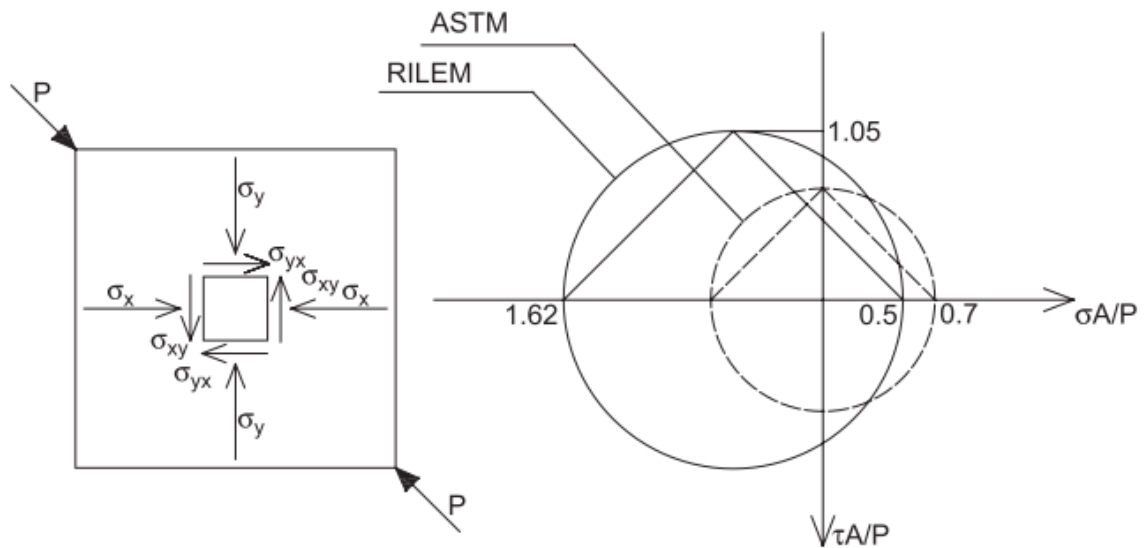


Figura 3.14 – Círculo de Mohr para as especificações ASTM e RILEM [52]

Onde a tensão de tracção fornecida pela ASTM é apresentada pela seguinte expressão:

$$f_{t,ASTM} = 0.707 \frac{P}{A} \quad \text{Equação 5}$$

A RILEM afirma que o campo de tensões não é uniforme e observando o círculo de Mohr na Figura 3.14 pode-se verificar diferentes valores para as tensões principais, as expressões para as tensões principais são as seguintes:

$$\sigma_I = 0.52 \frac{P}{A} \quad \text{Equação 6}$$

$$\sigma_{III} = -1.68 \frac{P}{A} \quad \text{Equação 7}$$

E por fim a tensão de tracção para a RILEM:

$$f_{t,RILEM} = 0.5 \frac{P}{A} \quad \text{Equação 8}$$

Na seguinte Figura 3.15 estão representadas numa análise de cores as tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_I$  e  $\sigma_{II}$  segundo a especificação RILEM onde considera as tensões na diagonal não uniformes.

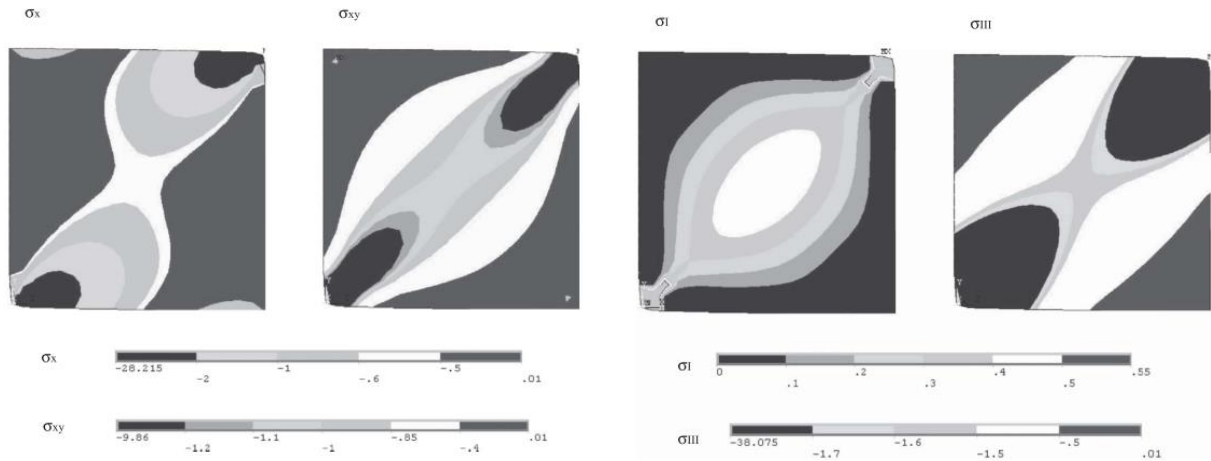


Figura 3.15 – Tensões normalizadas segundo a RILEM [52], da esquerda para a direita:  $\sigma_x$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_I$  e  $\sigma_{II}$ .

Neste estudo utilizou-se como guia a norma americana ASTM E 519 – 02 [50] para alvenarias e adaptou-se a norma para o caso em estudo. Utilizou-se a norma da ASTM por ser a norma mais utilizada e por se verificar que a norma ASTM apresenta-se como a mais conservativa na análise ao corte, mas devido ao estudo de Brignola *et al.* [52] optou-se também por analisar a especificação RILEM [51] pelas razões evocadas no estudo (análise de comparação entre as duas especificações no capítulo 4.11).

O principal objectivo passa pela determinação da tensão de corte, sendo assim torna-se importante o estudo do parâmetro de corte. A tensão de corte provocada pelo *diagonal test* não é um corte directo, como afirma Ismail [34] é um *diagonal shear*, ou seja, corte diagonal. O modo de ruptura apresenta uma falha diagonal, ou seja, um modo de falha de corte.

Este ensaio permite conhecer valores representativos de análise mecânica de uma alvenaria, tanto executada em laboratório como de uma parte de alvenaria real [32].

A dimensão normativa dos painéis de alvenaria 1,2 x 1,2 m com espessura variável e as fatias dos provetes em estudo com 15 x 15 cm e com 8 cm de espessura, obtém-se uma escala de 1:8. Então a partir desta escala definiu-se as dimensões normativas dos “apoios” de carregamento. Desenvolveu-se estes “apoios” à escala de modo a cumprir as indicações da norma, de referir que estes “apoios” aplicam uma força não concentrada, e estão representadas na Figura 3.16.



Figura 3.16 – “Apoios” do *diagonal test*

A máquina de teste utilizada foi a o *ZWICK/ROELL Z050* com célula de carga, com pré-carga de 50 N e deformação imposta de 0,7 mm/min.

A fatia encontra-se posicionada na diagonal e a máquina de teste aplica um carregamento de compressão nos cantos da fatia como mostra a Figura 3.17.



Figura 3.17 - *ZWICK/ROELL Z050* durante *diagonal test*

O cálculo da tensão de corte  $S_s$  (MPa), segundo a norma ASTM E 519 – 02 [50], efectua-se com a seguinte expressão:

$$S_s = \sigma I = \frac{0.707P}{A_n} \quad \text{Equação 9}$$

Em que  $P$  é o carregamento de compressão e  $A_n$  ( $\text{mm}^2$ ) a área (*net area*) que se calcula:

$$A_n = \frac{W + h}{2} tn \quad \text{Equação 10}$$

Em que  $W$  é a altura da amostra e  $h$  a largura da amostra,  $t$  a espessura da amostra (mm) e  $n$  a percentagem de área bruta que se considerou 1.

A ruptura do *diagonal test* ocorre paralelamente ao carregamento aplicado, ou seja, ao longo da diagonal da amostra e apresenta uma ruptura frágil (Figura 3.18), como no estudo de Kalali *et al.* [32].

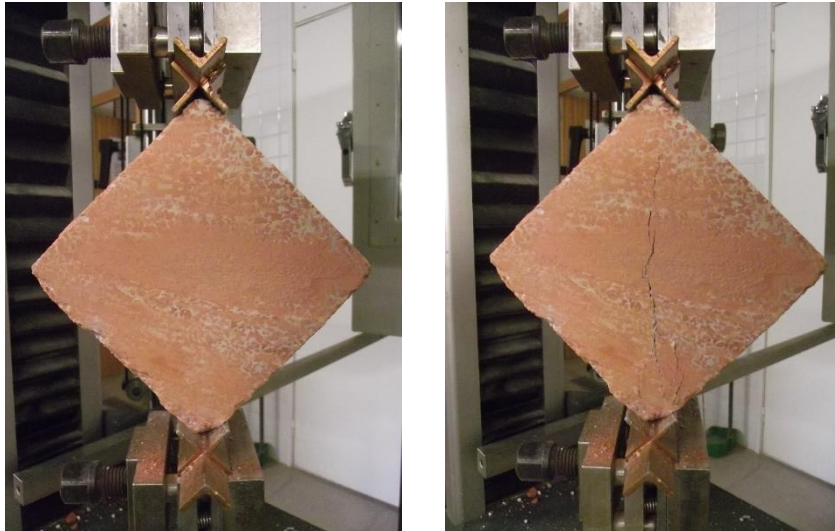


Figura 3.18 – *Diagonal test* antes e depois da ruptura

Alecci *et al.* em “*Shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar*” [53] refere dois tipos de ruptura, pela diagonal (“*D*”) ou pelas juntas entre tijolos (“*ND*”), nas fatias da presente dissertação apenas acontece o primeiro caso onde a ruptura é paralela ao carregamento. O segundo caso não acontece nas fatias estudadas nesta dissertação porque não existe juntas regulares. Apenas a ruptura não passa pela diagonal quando a fatia apresenta muitos vazios como mostra a Figura 3.19, não sendo também uma ruptura “*ND*”.



Figura 3.19 – Ruptura onde a fissura não é paralela à direcção do carregamento

### 3.7.2 Ensaio de corte directo ou *direct shear test*

O ensaio de corte directo ou *direct shear test* é um ensaio que aplica duas forças com a mesma direcção mas com sentidos inversos e com eixo diferente. Como possível ver na Figura 3.20 do lado esquerdo, as astes aplicam a força em cada metade de secção transversal contrária provocando uma ruptura por corte paralela às forças aplicadas.

Como o objectivo é a análise de corte, o Eurocódigo 8 aconselha a utilização do ensaio de corte directo.

Tal como no *diagonal test* a máquina de teste utilizada foi a o *ZWICK/ROELL Z050* com célula de carga, com pré-carga de 50 N e deformação imposta de 0,9 mm/min, estes parâmetros de acordo com o trabalho de Guerreiro [42] onde também utilizou-se o ensaio de corte directo.

As amostras testadas foram fatias que tiveram o mesmo processo das testadas no *diagonal test*, com a utilização do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons realizado *a priori* de ser testado ao corte, de forma a obter comparação.

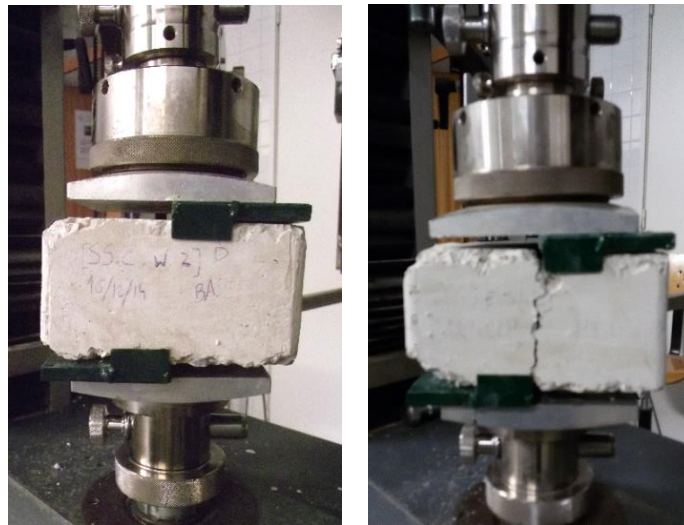


Figura 3.20 – Ensaio de corte directo: figura da esquerda em ensaio e figura da direita a fatia após ensaio

A partir da força de ruptura  $F$  retirada do ensaio de corte directo, é possível calcular a resistência ao corte  $T\tau$  com a seguinte equação:

$$T\tau = \frac{F}{h L} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

$T\tau$  – Resistência ao corte [MPa]

$F$  – Força de ruptura [N]

$h$  – Altura do provete [mm]

$L$  – Lado do provete [mm]

### 3.8 Desenvolvimento do ensaio combinado compressão-corte (Mohr-Coulomb)

A vulnerabilidade dos edifícios de alvenarias antigas a terremotos é muito elevada, e o principal carregamento aplicado aquando um sismo é o carregamento de corte. Portanto torna-se essencial perceber de que forma se comporta quando aplicado este tipo de acções.

Um dos ensaios possíveis de análise de corte ou combinando compressão-corte é o ensaio de triplete, onde é aplicado normalmente para modelos novos e apresenta uma simplicidade interessante.

Existem ainda outros tipos de ensaios que combinam a compressão com o corte mas que não se enquadram nas amostras em estudo. Como o ensaio representado na Figura 3.21 da esquerda que avalia a resistência da argamassa entre blocos [32] e um ensaio que retira através de carotagem uma amostra cilíndrica de uma alvenaria (de uma zona entre dois blocos) e posteriormente testada através do ensaio



de tracção por compressão diametral que mais uma vez analisa a resistência da junta de argamassa entre blocos, representada na Figura 3.21 da direita [7].

Na Figura 3.22 está representado o ensaio de triplete sem compressão, mas quando apresenta conjunta também compressão, as forças de compressão neste caso serão aplicadas horizontalmente.

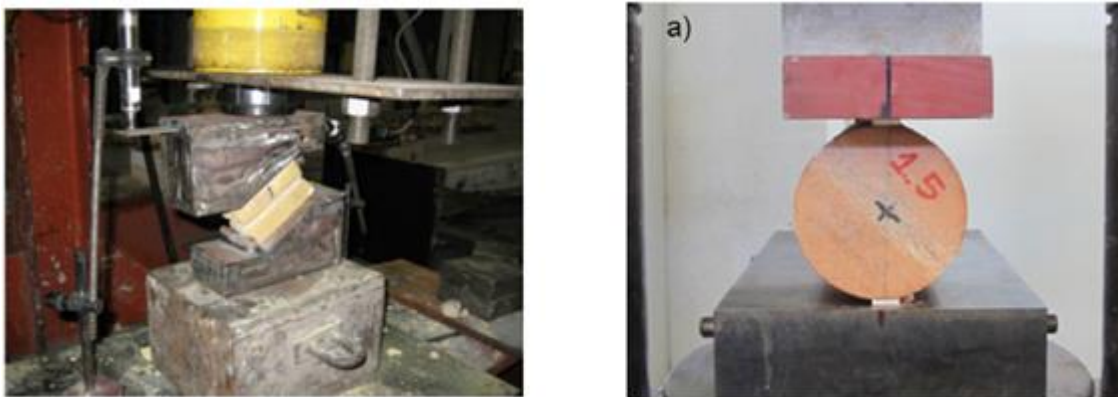


Figura 3.21 – Esquerda: ensaio combinado compressão e corte [32] e direita: ensaio de tracção por compressão diametral de uma amostra retirada de uma alvenaria [7]

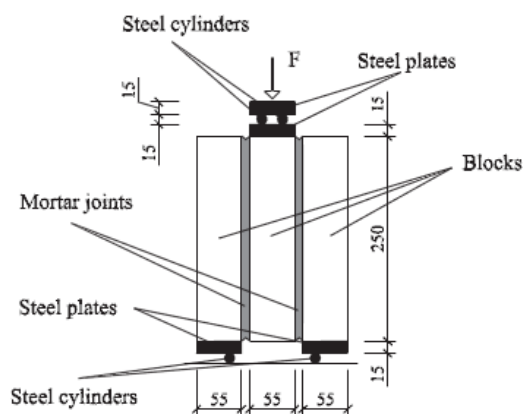


Figura 3.22 – Ensaio de triplete para análise de resistência ao corte, sem compressão [53]

A ruptura pode acontecer entre blocos, que significa baixa resistência da argamassa (Figura 3.23 “a”) ou pode acontecer numa diagonal como mostra a Figura 3.23 “b”).

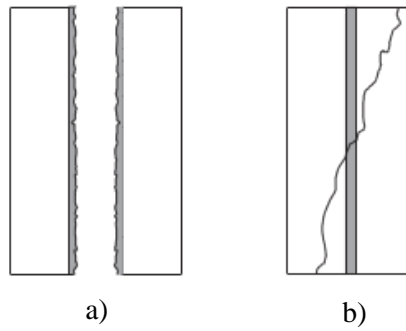


Figura 3.23 – Ruptura do ensaio de triplete, na imagem da esquerda pela junta e da direita pela diagonal [53]  
(adaptado)

O ensaio de triplete ou *triplet test* é definido pela norma EN 1052-3. Este ensaio é exigido pelo Eurocódigo 6 para análise da resistência ao corte, tal como no Eurocódigo 8 é exigido o *diagonal test* como apresentado anteriormente [53].

O artigo de Mazzotti *et al.* [7] apresenta o ensaio de triplete para alvenarias, com a combinação de compressão-corte. Onde o carregamento de compressão foi aplicado para três amostras com diferentes valores mas a carregamento constante. Ou seja, numa primeira fase a amostra foi aplicado um carregamento constante de compressão e numa segunda fase um carregamento de corte até à ruptura.

O cálculo da tensão de corte para o ensaio de triplete segundo a norma EN 1052-3 é dada pela seguinte expressão [33]:

$$f_v = \frac{F_{s,max}}{2 \times A} \quad \text{Equação 12}$$

Onde  $F_{s,max}$  é a força de corte máxima e  $A$  a área de secção transversal.

A expressão da recta do critério de Mohr-Coulomb é dada pela seguinte equação [32]:

$$f_v = f_{vo} + \sigma \times \tan \varphi \quad \text{Equação 13}$$

Onde  $f_v$  é a tensão de corte,  $f_{vo}$  é a tensão de corte na origem ou também considerada a coesão,  $\varphi$  é o ângulo de fricção interno e  $\sigma$  é a tensão de compressão.

O ensaio de triplete também é utilizado em muretes que simulam alvenarias antigas como é o caso da Figura 3.24, com compressão vertical e corte horizontal.

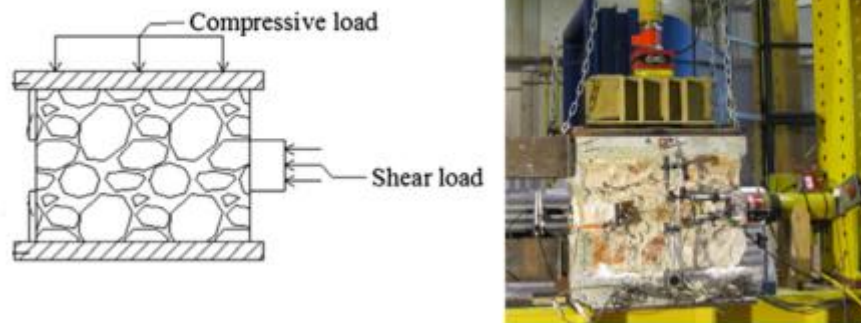


Figura 3.24 – Ensaio de triplete com compressão-corte [33]

O desenvolvimento do ensaio combinado compressão-corte utilizando o critério de Mohr-Coulomb tem como intuito o cálculo dos parâmetros de ângulo de fricção interno ( $\varphi$ ) e de tensão inicial de corte ( $f_v0$ ) ou coesão.

Então a partir de estudos anteriores ([53], [7], [54] e [33]), desenvolveu-se um modelo de carregamento conjunto de compressão-corte representado na Figura 3.25, com  $F_c$  as forças de compressão e com  $F_s$  as forças de corte.

As forças de corte são aplicadas pela máquina de teste *ZWICK/ROELL Z050* tal como no ensaio de corte directo apresentado no capítulo 3.7.2, e as forças de compressão são aplicadas através de quatro varões riscados com porcas que aplicam forças nos painéis amarelos e por sua vez na amostra, estas forças são aplicadas através de uma chave dinamométrica de alta precisão.

No esquema da Figura 3.25: as placas de aplicação da força de corte estão representados de cor verde, as placas aonde estão aplicados as forças de compressão de amarelo e as amostras de cor cizenta. Ainda no esquema as forças de compressão estão divididas por quatro porque em cada placa estão aplicados forças de compressão em quatro pontos/varões.

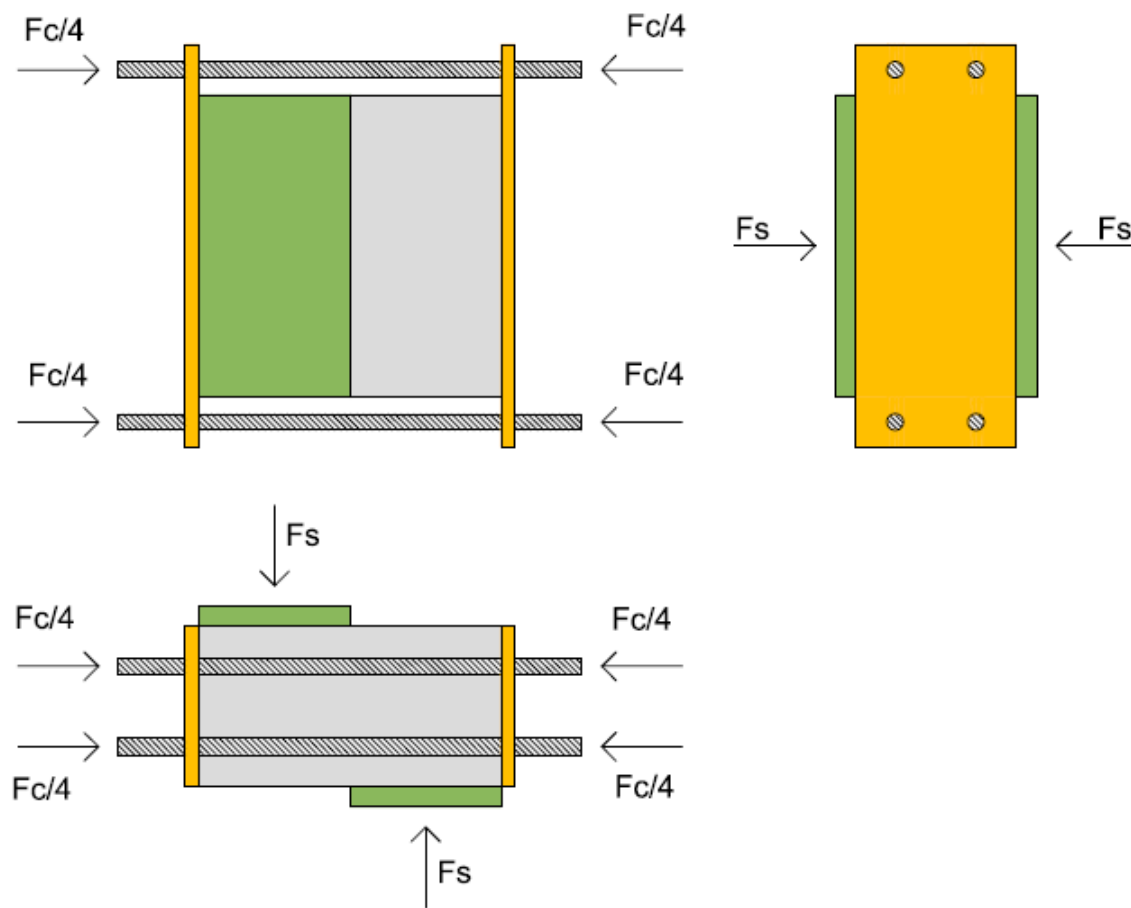


Figura 3.25 – Esquema de ensaio combinado compressão-corte

Tendo pelo menos três amostras, e aplicando a cada uma das amostras uma força de compressão constante é possível definir uma força de corte correspondente. Isto é, cada força de compressão aplicada, corresponderá a uma força de ruptura de corte (exemplo:  $\sigma / - \tau /$ ), tal como no ensaio de triplete com compressão [7]. Determinando estes pontos é possível traçar uma recta a partir de uma regressão linear, onde o declive apresenta-se como o ângulo de fricção interno ( $\phi$ ) e a ordenada na origem como a tensão inicial de corte ou coesão ( $f_v0$ ) (Figura 3.26). No mínimo deve-se utilizar três amostras, mas quanto maior for o número de amostras, maior será a qualidade de resultados.

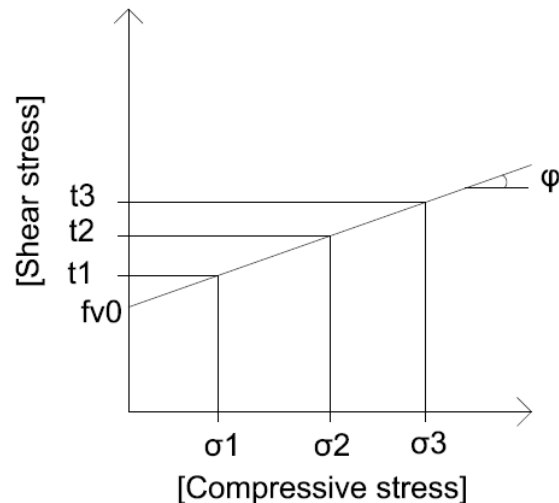


Figura 3.26 – Critério de Mohr-Coulomb

### 3.9 Avaliação de imagens captadas atavês da lupa binocular

Com o intuito de avaliar o preenchimento de vazios e as ligações entre o *grout* e as partículas do meio poroso, captou-se imagens de amostras de provetes injectados com *grout*. Onde as amostras foram retiradas de provetes injectados de material cerâmico e material calcário após testadas nos ensaios destrutivos.

De acordo com a tese de doutoramento de Rato [55], o aparelho utilizado para as imagens recolhidas em pormenor das amostras do material injectado com *grout* está representado na Figura 3.30, com a lupa binocular e a máquina fotográfica para registo fotográfico.

O principal objectivo do uso desta técnica passa por perceber e conhecer a morfologia interna do meio poroso injectado, perceber de que forma o *grout* preenche os vazios e ainda perceber qual o estado das ligações existentes entre o *grout* e as partículas do meio poroso.

O procedimento de preparação das amostras foi o seguinte:

- recolheu-se amostras de provetes já testados em ensaios mecânicos;
- em pequenos recipientes introduziu-se as amostras com uma resina (Figura 3.27);
- posteriormente levou-se ao exsicador para retirar todo o ar e para secagem levou-se à estufa (Figura 3.27);



Figura 3.27 – Amostras no exsiccador

- após secagem cortou-se os excessos de resina de forma a obter uma secção plana para melhor visualização na lupa (Figura 3.28);



Figura 3.28 – Corte de excesso na amostra

- poliu-se as amostras com duas lixas de dimensão diferente, primeiro a mais grossa e depois a mais fina de modo a provocar uma superfície sem imperfeições e regular (Figura 3.29);



Figura 3.29 – Preparação das amostras: polimento

- e por fim com a lupa fotografaram-se as amostras (Figura 3.30).



Figura 3.30 – Lupa binocular e máquina fotográfica

A resina utilizada na avaliação das imagens captadas pela lupa binocular é uma resina de impregnação “*Epofix™ Cold-Setting Embedding Resin*” com um corante verde.





## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 4.1 Injectibilidade

A injectibilidade permite avaliar de que forma o *grout* preenche o meio poroso. Este parâmetro foi apresentado na secção 2.3. O Quadro 4.1 apresenta os valores de injectibilidade para cada provete injectado de material calcário ou material cerâmico.

Tendo em conta que o volume de vazios para os meios porosos D e E é superior ao meio poroso C, a quantidade de *grout* injectado também é superior.

Globalmente os valores de injectibilidade para o material calcário apresentam valores superiores ao material cerâmico, como podemos verificar no meio poroso C no estado seco. O material calcário apresenta valores de 0,82 e o material cerâmico apresenta valores de 0,76.

Quando o meio poroso encontra-se seco, o *grout* apresenta maior aderência com as partículas do meio poroso, mas perde maior quantidade de água livre devido à sucção por parte dos poros, provocando assim uma diminuição da capacidade de injeção. Constata-se que com a presença de água as amostras pré-molhadas apresentam melhor injectibilidade. Já no material calcário verifica-se uma diferença reduzida de injectibilidades em relação à presença de água e no material cerâmico uma diferença significativa em todos os meios porosos.

Na sua generalidade, os valores de injectibilidade para o meio poroso seco são inferiores aos valores de injectibilidade para o meio poroso pré-molhado. Quando o meio encontra-se seco, o *grout* à medida que circula, perde água livre devido à pressão de sucção dos poros (especialmente para o material cerâmico), causando do ponto vista reológico uma perda das suas propriedades e consequentemente diminuição da capacidade de injeção.

Um aspecto que importa referir para explicação dos valores de injectibilidade serem superiores nas amostras pré-molhadas é o elevado ângulo de contacto no meio poroso pré-molhado (como se pode ver no Quadro 2.3), pois as forças de atracção entre as paredes dos poros e *grout* são inferiores em relação às forças de atracção quando o material encontra-se seco. Assim, a resistência criada nas paredes dos poros à passagem do *grout* é inferior, e por conseguinte os valores de injectibilidade são superiores.

Quadro 4.1 – Injectibilidade dos meios porosos

Material	Meio Poroso	Presença de água	"I" grout injectability (-)
Calcário	C	Seco	0,82
		Pré - molhado	0,84
	D	Seco	0,85
		Pré - molhado	0,86
	E	Seco	0,94
		Pré - molhado	0,83
Cerâmico	C	Seco	0,76
		Pré - molhado	0,81
	D	Seco	0,75
		Pré - molhado	0,88
	E	Seco	0,84
		Pré - molhado	0,92

## 4.2 Avaliação de ensaio ultra-sons com transdutores de diferente configuração geométrica

Terminados os ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons com os dois transdutores, configuração cilíndrica e cônica, a análise dos resultados apresenta-se deduzindo uma analogia global ou mais particular. Analogia global para os dois materiais ou para todos meios porosos e analogia particular quando se refere apenas a um material ou meio poroso.

### 4.2.1 Influência do tipo de material

Estudou-se a influência do tipo de material entre o material calcário (brita) e o material cerâmico (tijolo) para os transdutores cilíndricos e cónicos.

Verificou-se que é comum nos dois materiais a velocidade de propagação de ultra-sons com os transdutores cilíndricos ser superior à dos transdutores cónicos, como é possível visualizar na Figura 4.1. Os transdutores cilíndricos apresentam menor variância entre medições, e assim apresentam melhores resultados no campo próximo, visto que inicialmente o sinal não é tão perturbado por interferências entre ondas. Como o transdutor cilíndrico emite ondas paralelas entre si, as interferências são inferiores, enquanto que o transdutor cónico emite ondas a partir de um feixe em forma triangular, o que poderá levar ao seu cruzamento e assim a existência de interferências. Este estudo de variação de medições será estudado no capítulo 4.3.

Na Figura 4.1 é possível verificar outro aspecto global, a velocidade de propagação de ultra-sons é superior para o material calcário em relação ao material cerâmico, sendo possível justificar pela superior massa volúmica no material calcário, pois as ondas circulam de modo mais rápido sem encontrar tantas descontinuidades como no material cerâmico.

Da análise do meio poroso C (Figura 4.1), como foi referido anteriormente, a velocidade de propagação de ultra-sons para o material calcário em relação ao material cerâmico é superior. No material calcário os valores entre os dois tipos de transdutores são similares, enquanto que no material cerâmico estes valores divergem com uma diferença de aproximadamente 700 m/s.

O meio poroso D (Figura 4.1) apresenta a mesma tendência quanto aos dois materiais, com o material calcário a apresentar uma compacidade superior ao material cerâmico.

Na análise de velocidade com os dois tipos de transdutores no meio poroso E (Figura 4.1), verificou-se que para os transdutores cilíndricos a velocidade é superior, sendo essa diferença mais acentuada na comparação entre meios porosos, como se verifica no material calcário com uma diferença de aproximadamente 900 m/s.

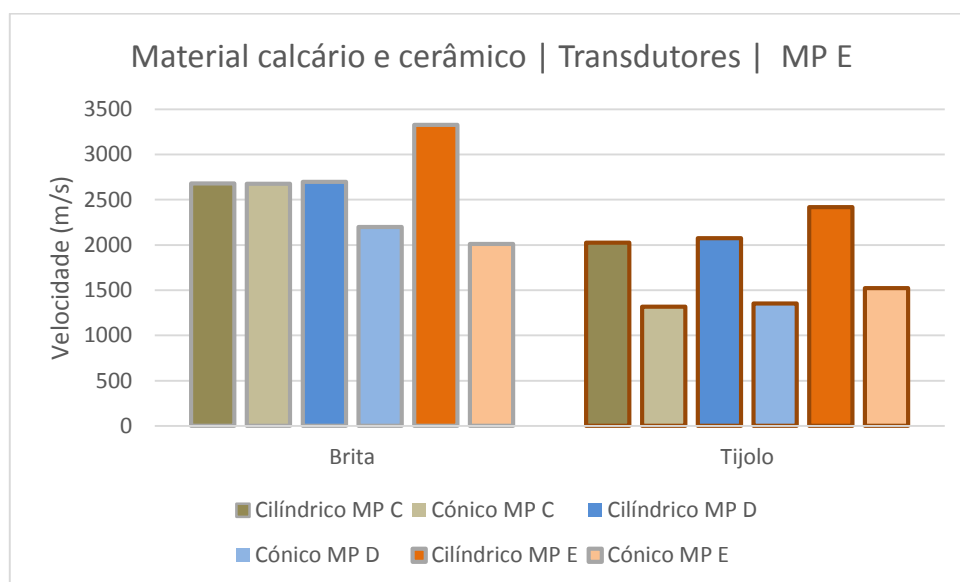


Figura 4.1 - Velocidade de propagação de ultra-sons para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos

#### 4.2.2 Influência do meio poroso

Este sub-capítulo tem como objectivo a comparação entre os três tipos de meios porosos.

Na Figura 4.2 verifica-se que o meio poroso mais compacto é o meio poroso E, de seguida o D e finalmente o C. Tal pode ser explicado pela existência de partículas finas no meio poroso C. Esta tendência não se verifica apenas nas medições com os transdutores cónicos para o material calcário.

Os meios porosos D e E apresentam maior velocidade devido à menor quantidade de interfaces do meio poroso, dado que na sua constituição não existem partículas finas como no meio poroso C. Segundo Coelho [41], menor quantidade de interfaces implica menor quantidade de perdas de energia por dispersão, ou seja, há uma menor dissipação de energia das ondas sónicas que atravessam o material.

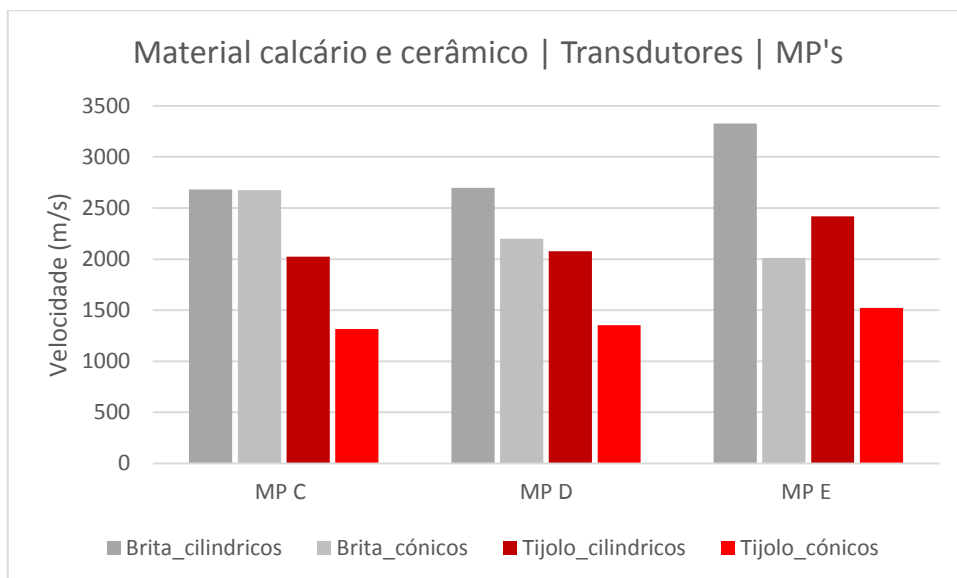


Figura 4.2 - Velocidade de propagação de ultra-sons para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos para cada meio poroso

Verificou-se que na fatia da base é um pouco difícil definir tendências (Figura 4.3), tal como em todo o provete (Figura 4.2). Para o material calcário com os transdutores cilíndricos é notável uma velocidade superior no meio poroso E, enquanto que nos transdutores cónicos o valor de velocidade mais alto registado é no meio poroso D.

É interessante visualizar que para o material cerâmico, a medição com os transdutores cilíndricos apresenta uma velocidade de propagação de ultra-sons muito semelhante para todos os meios porosos. Por fim, verificou-se que para os transdutores cónicos que a tendência é igual independentemente do tipo de material.

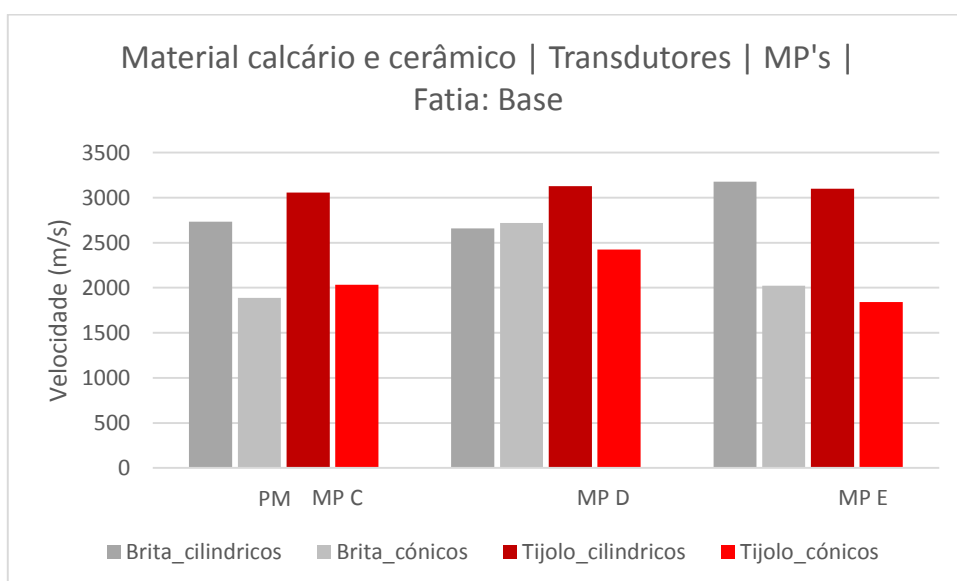


Figura 4.3 - Velocidade de propagação de ultra-sons na fatia da base para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos para todos meios porosos

Por sua vez, na fatia do meio (Figura 4.4), verifica-se que para o material calcário com transdutores cilíndricos os valores de velocidade por ordem crescente tomam a sequência: C, D e E. No material cerâmico a tendência dos transdutores cilíndricos e cónicos é semelhante no meio poroso E, mas com uma velocidade superior.

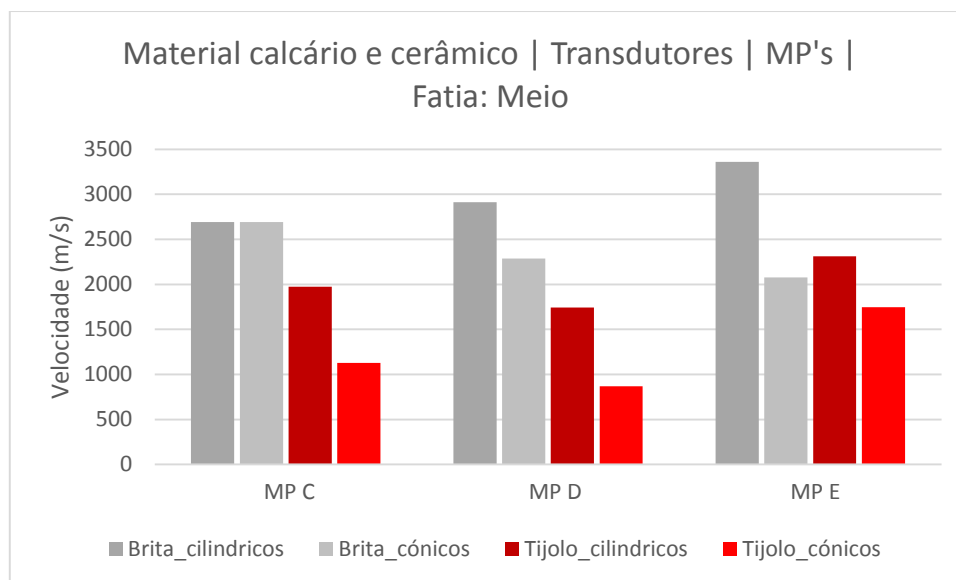


Figura 4.4 - Velocidade de propagação de ultra-sons na fatia do meio para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos para todos meios porosos

Na fatia do topo (Figura 4.5), como esperado, a velocidade tem uma evolução crescente C, D e E, excepto no material calcário com os transdutores cónicos.

Na parte superior do provete no material cerâmico existe uma notória dificuldade de injeção, uma vez que o *grout* perde grande quantidade de água. Esta perda ocorre devido à absorção de água por parte dos poros do material cerâmico, pois estes poros têm uma dimensão reduzida e por isso não permitem a entrada das partículas de ligante.

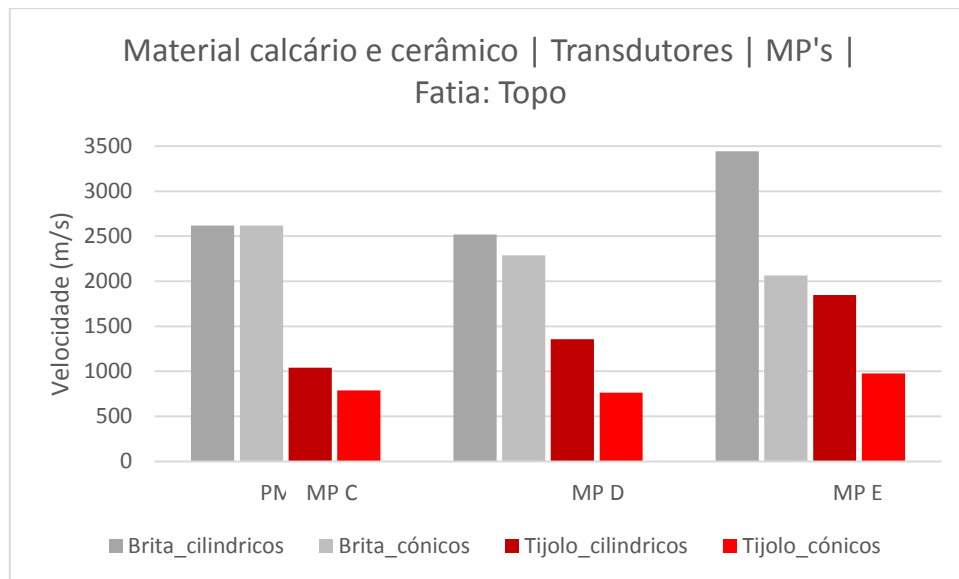


Figura 4.5 - Velocidade de propagação de ultra-sons na fatia do topo para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos para todos meios porosos

### 4.2.3 Influência da pré-molhagem

Utilizou-se a pré-molhagem dos moldes, com o intuito de perceber de que forma a presença de água condiciona as propriedades do meio injectado. Foi realizada antes da injeção de *grout* como realizado por Brás *et al.* [3] e por Jorne *et al.* [9].

Após a injeção de água nos moldes, estes reposam durante cerca de 30 minutos e a água em excesso escorre para fora do molde.

A pré-molhagem pretende simular a existência de água numa alvenaria ou a possível pré-molhagem numa alvenaria real. Esta pré-injeção pode melhorar algumas propriedades tais como a injectibilidade. Mas por outro lado aumentar a quantidade de água livre, provocando um aumento das propriedades de instabilidade (como a segregação ou exsudação) e a retracção [1]. De salientar que este último é um parâmetro importante nas ligações entre panos [56].

Com intuito de perceber de que forma a pré-molhagem influencia um meio poroso injectado, de seguida será apresentado a comparação de velocidades de propagação de ultra-sons entre o material calcário e o material cerâmico para todos os meios porosos e com os dois tipos de transdutores.

No meio poroso C (Figura 4.6) verifica-se que no material calcário seco os valores são aproximadamente iguais para os dois transdutores, o que não se verifica em outro caso.

No material calcário sujeito a pré-molhagem verificou-se valores de velocidade de ultra-sons inferiores aos valores do meio poroso seco. Tal é expectável pois a existência de água em alguns vazios não permite o preenchimento destes por *grout*. Enquanto que no material cerâmico isto não se verifica pois no estado seco houve reduzida injectibilidade.

No material cerâmico a variação é constante, o que pode ser justificado pelo preenchimento de vazios de pequena dimensão por água. A água preenche estes poros e permite que o *grout* não perca

água à medida que percorre o meio poroso, existindo uma melhor injectibilidade nos meios porosos pré-molhados, dado que o *grout* não perde fluidez como apresentam os valores na Figura 4.6.

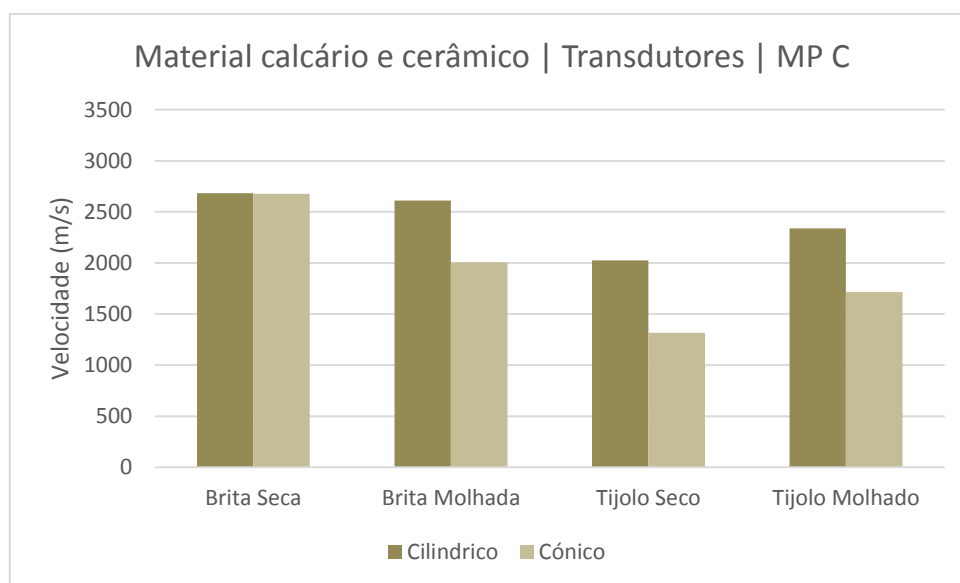


Figura 4.6 - Velocidade de propagação de ultra-sons para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos para o estado seco e molhado no meio poroso C

Em geral, a velocidade de propagação de ultra-sons para o meio poroso D (Figura 4.7) é superior aos valores do meio poroso C. Tal como verificado anteriormente, os valores para os transdutores cilíndricos são superiores aos valores dos transdutores cónicos, onde a diferença entre os dois transdutores é mais dispar no material calcário, principalmente no pré-molhado.

O material calcário apresenta valores semelhantes entre a amostra seca e a pré-molhada, enquanto que no material cerâmico são algo dispares pois a quantidade de *grout* injectado é inferior na amostra seca, como se pode ver na Figura 4.7.

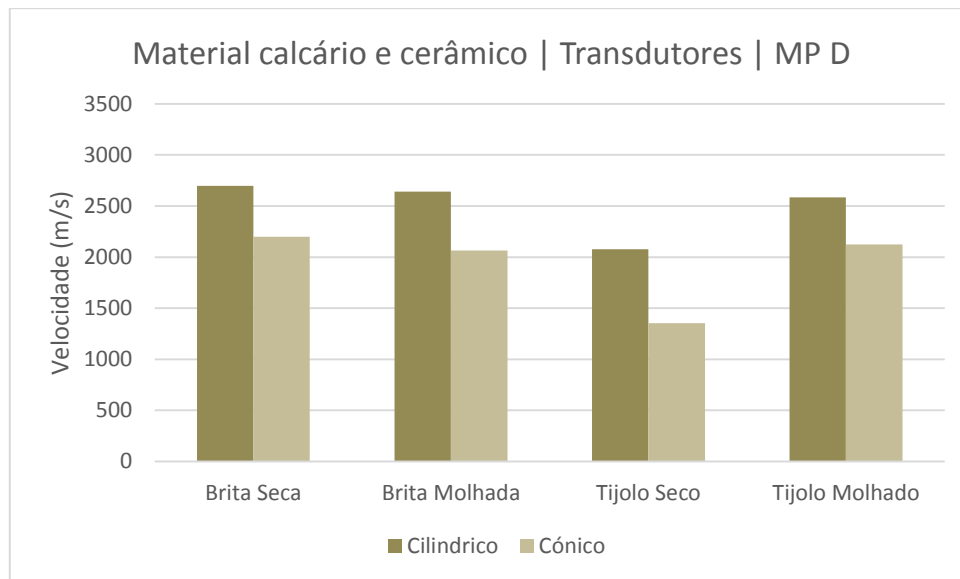


Figura 4.7 - Velocidade de propagação de ultra-sons para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos para o estado seco e molhado no meio poroso D

A compacidade no meio poroso E (Figura 4.8) é superior, pois apresenta menor quantidade de vazios e menor quantidade de interfaces entre o *grout* e as partículas do meio poroso. No material calcário, tanto para seco como para o pré-molhado, apresentam valores muito díspares entre a análise com transdutores cilíndricos e cónicos, pois os dois transdutores apresentam feixes diferentes. O cilíndrico apresenta um feixe linear e o cónico um feixe de forma triangular (ou “*sector*”), sendo que o transdutor cilíndrico apresenta melhor comportamento no campo próximo.

Quanto ao material cerâmico, este apresenta uma tendência diferente da verificada nos meios porosos C e D, isto é, existe grande semelhança entre os valores no estado seco e pré-molhado. Tal deve-se a um binómio relacionando com a maior abertura e quantidade de vazios e dimensão das partículas no meio poroso E em relação aos outros. Ou seja, para o estado seco existe menor superfície específica que provoca menor molhagem e consequentemente maior capacidade de injeção, por outro lado no estado pré-molhado existe maior quantidade de vazios. Verifica-se que comparando com o meio poroso D, o meio poroso E apresenta maior diferença para o estado seco, já no meio poroso pré-molhado essa diferença não muito elevada.

É de salientar a particularidade da variação da amostra seca entre os transdutores cilíndricos e cónicos ser superior, que pode ser explicada pela maior dificuldade de propagação de ultra-sons dos transdutores cónicos em fatias com grandes zonas sem *grout*, como é o caso da parte superior da amostra em causa (meio poroso C e pré-molhado).



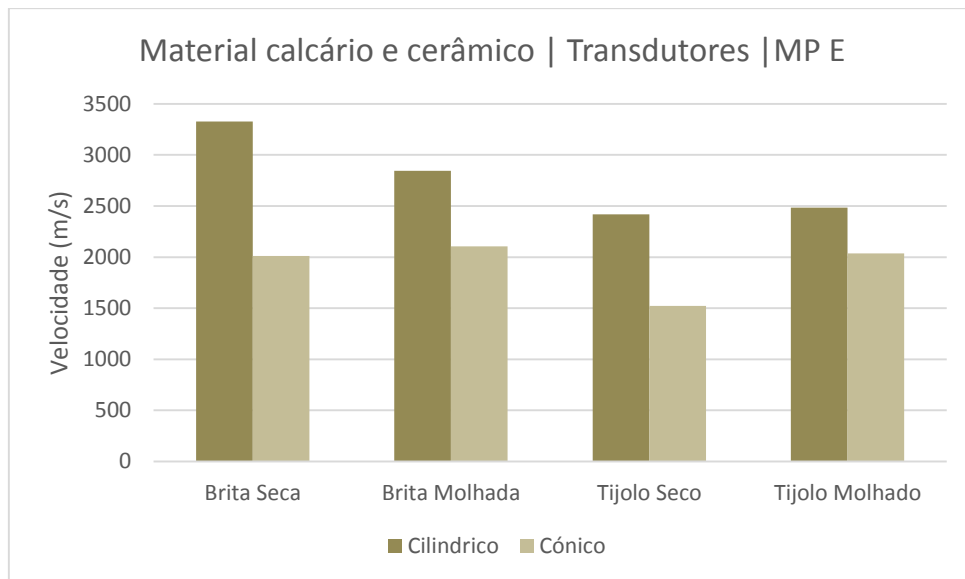


Figura 4.8 - Velocidade de propagação de ultra-sons para material calcário e cerâmico com transdutores cilíndricos e cónicos para o estado seco e molhado no meio poroso E

A compactidade das amostras segue a mesma tendência nos secos e pré-molhaodos, onde o mais compacto é o meio poroso E e o menos compacto o meio poroso C. As velocidades são maiores no meio poroso E em comparação com o D devido à menor quantidade de interfaces, o que era expectável uma vez que acontece o mesmo quando o meio poroso se encontra seco.

Os meios porosos D e E apresentam menor quantidade de partículas finas e menor quantidade de interfaces (este caso acontece geralmente no meio poroso C, exemplo de material cerâmico MP C encontra-se na Figura 4.9), que provocam maior atenuação acústica, dado que quando uma onda colide com uma interface existe uma dissipação de energia [1]. Pelos motivos descritos anteriormente, o meio poroso C apresenta menor velocidade de propagação de ultra-sons.

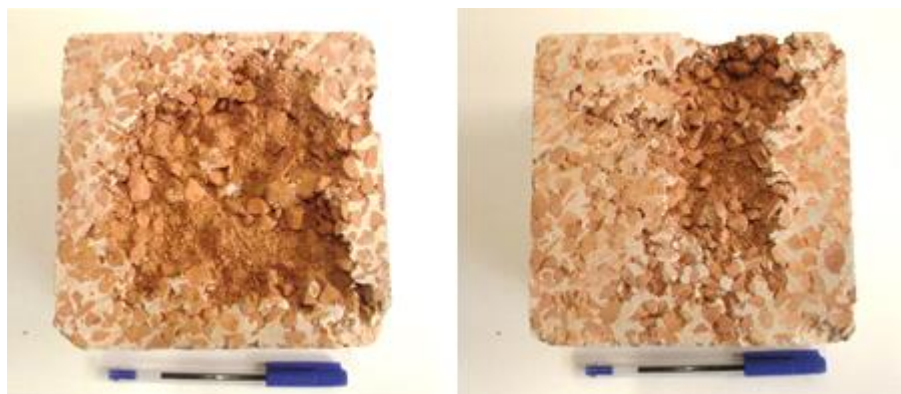


Figura 4.9 – Fatias de material cerâmico do meio poroso C, fatia da esquerda da base e da direita a fatia do meio

Na comparação entre transdutores, o meio poroso que apresentou maiores diferenças foi o meio poroso C e o que apresentou menores foi o meio poroso D, principalmente para o material cerâmico.

Pois no meio poroso C, existe uma maior quantidade de vazios e interfaces. Assim, a onda sónica está sujeita a um maior número de descontinuidades que provocam atenuação acústica e consequentemente originam uma menor velocidade de ultra-sons.

### **4.3 Nota final sobre medição velocidade de propagação de ultra-sons**

A avaliação da medição da velocidade de ultra-sons para os provetes com os dois tipos de transdutores, levou a algumas conclusões a nível de medição em laboratório e outras durante o tratamento e avaliação de resultados.

Em laboratório destacou-se a maior qualidade de valores para a medição realizada com os transdutores cilíndricos, tal acontece porque para cada medição a oscilação era inferior e por isso a medição foi feita mais rapidamente. Apesar da maior quantidade de gel existente nos transdutores cilindros, observou-se que estes são mais eficazes, apenas com a particularidade de no caso da superfície encontrar-se algo imperfeita, os valores apresentam menor qualidade.

Nos transdutores cónicos a medição é complicada porque torna-se difícil fazer um ângulo recto perfeito com a superfície, de modo a efectuar a medição correctamente, apesar do uso do gel ajudar neste processo.

Na análise de valores a partir do cálculo do desvio padrão do tempo para as cada três medições e para cada posição de cada amostra, verificou-se que a média de desvio padrão para os valores medidos com transdutores cilíndricos são inferiores aos valores com transdutores cónicos, como se pode visualizar no Quadro 4.2. Uma possível explicação para esta tendência é resolução de cada transdutor no campo próximo, onde o transdutor cilíndrico apresenta maior resolução em relação ao cónico e por isso menores valores de desvio padrão. Dado que o transdutor cónico apresenta um feixe triangular, este pode causar interferências de ondas, já no transdutor cilíndrico as ondas acústicas são emitidas paralelamente entre si e por este motivo as interferências são inferiores. De referir, a excepção nos valores para o material calcário seco onde os valores são iguais, não tendo encontrado razão aparente.

A unidade utilizada foi o tempo em microsegundos, dado que a medição foi feita a partir do tempo que o sinal demora entre o transdutor emissor e receptor, com o tempo medido e sabendo a distância entre transdutores é simples o cálculo da velocidade.

Na relação entre as amostras secas e pré-molhadas, para o material calcário as amostras secas tem menor desvio padrão em relação às amostras pré-molhadas e para o material cerâmico nos transdutores cilíndricos apresentam valores muito semelhantes, enquanto que para os transdutores cónicos o desvio padrão é superior na amostra seca, dado que nestas amostras o volume de vazios é superior.

Quanto ao tipo de material, o calcário apresenta menor desvio padrão em comparação com o cerâmico, o que é natural e expectável devido à menor capacidade de injeção do *grout* no material cerâmico.

A partir destes factos pode-se afirmar que a medição de velocidade de propagação de ultra-sons com transdutores cilíndricos apresenta valores com maior qualidade quando comparado com os transdutores cónicos. Para chegar a esta conclusão é necessário ter em conta as razões explicitadas acima, em relação à medição em laboratório e aos valores calculados de desvio padrão, onde os transdutores cilíndricos apresentam valores mais significativos em comparação com os transdutores cónicos, não esquecendo a análise feita especificamente em cada amostra estudada.

Por estes motivos, de seguida nas avaliações dos ensaios mecânicos utiliza-se os valores da medição com os transdutores cilíndricos.

Quadro 4.2 – Desvios padrão para as medições de velocidade de ultra-sons para material calcário e cerâmico, com ou sem presença de água e para os dois tipos de transdutores [s]

Material	Presença de água	Cilindros	Cónicos
Brita	Seco	0,31	0,31
	Pré-molhado	0,40	2,84
Tijolo	Seco	0,91	4,42
	Pré-molhado	0,89	3,46

## 4.4 Avaliação e comparação entre a injectabilidade e o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Como apresentado em 2.2, a injectabilidade calcula-se com a Equação 1 (todos valores encontram-se no Quadro 4.1).

Neste sub-capítulo verificar-se-à a validade do ensaio de velocidade de propagação ultra-sons comparando com a injectabilidade. Este estudo utiliza os valores de velocidade de propagação de ultra-sons medidos com transdutores cilíndricos, conforme explicitado acima.

De modo a perceber a fiabilidade do ensaio de velocidade ultra-sons, comparou-se os valores de injectabilidade de cada provete. De seguida será apresentado um quadro de comparação entre a velocidade média de ultra-sons e a injectabilidade.

No meio poroso C os valores de velocidade de propagação de ultra-sons apresentam a mesma tendência que os valores de injectabilidade (Quadro 4.3), onde o material calcário apresenta maior velocidade e injectabilidade. No material cerâmico seco é bastante visível a grande diferença de compacidade entre da fatia da base e as outras fatias do meio e do topo. Este fenómeno acontece no material cerâmico porque o *grout* à medida que penetra o meio poroso perde água livre, absorvida pelos poros das partículas do meio poroso, essencial para a fluidez e capacidade de injeção. A perda de água

livre aumenta a viscosidade e a tensão de cedência de tal forma que pode chegar a valores que a penetração é interrompida, bloqueando em certos pontos sem conseguir preencher todas as zonas.

Tal como em quase todas as amostras, verifica-se que em altura o gradiente é negativo em ambos os materiais, ou seja, em altura a velocidade de ultra-sons vai reduzindo (Quadro 4.3).

Ainda no meio poroso C, mas com pré-molhagem a anteceder a injeção de *grout*, é possível verificar que os valores apresentados seguem a mesma tendência quando o meio poroso estava seco na relação entre a velocidade de ultra-sons e injectibilidade. O valor da velocidade de ultra-sons para o material calcário continua a ser superior ao material cerâmico. Neste caso a variação de velocidade em altura é constante quando comparado com a amostra no estado seco.

A injectibilidade apresenta valores superiores, pois no material cerâmico como as partículas de água da pré-injeção estão nas paredes das partículas do meio poroso e permitem melhor capacidade de injeção.

No meio poroso D, onde as partículas têm uma dimensão semelhante e não têm na sua constituição partículas finas, houve novamente um valor reduzido de injectibilidade no material cerâmico seco. Verifica-se mais uma vez nas duas fatias superiores, a baixa compacidade existente visível através da velocidade de propagação de ultra-sons (Quadro 4.3). Neste caso também se observa maior velocidade e maior injectibilidade para o material calcário, devido à menor existência de vazios internos nas partículas do meio poroso em relação ao material cerâmico. Assim, a capacidade de absorção é superior para as partículas do material cerâmico, onde a água consegue entrar em alguns poros, enquanto que as partículas de ligante não conseguem entrar e preenche-los. Esta perda de água livre provoca uma diminuição da sua injectibilidade.

Analisando a amostra pré-molhada do meio poroso D, verifica-se que tal como aconteceu no meio poroso C pré-molhado, os valores de velocidades de ultra-sons no material cerâmico para as fatias superiores apresentam um comportamento constante, quando comparado com a amostra seca. Os valores de velocidade de ultra-sons apresentam-se muito semelhantes para os dois tipos de materiais no estado pré-molhado, enquanto que no estado seco havia uma diferença de cerca de 621 m/s. Quanto à injectibilidade pode-se dizer que são iguais, uma vez que diferem 0,02. Sendo assim, observa-se uma tendência diferente até então, pois a injectibilidade no material cerâmico é superior ao valor para o material calcário, ou seja, apresenta uma tendência oposta ao valor da velocidade de ultra-sons. No entanto, não é possível tirar-se uma conclusão pois os valores de injectibilidade são demasiado próximos.

No meio poroso E seco (Quadro 4.3) mais uma vez as relações são muito semelhantes, no material cerâmico existe uma grande redução de velocidade de ultra-sons na fatia do meio e menor injectibilidade no material cerâmico. Apenas o meio poroso E seco apresenta um gradiente positivo, ou seja, em altura a compacidade do provete aumenta.

No meio poroso E pré-molhado (Quadro 4.3) para o material cerâmico as fatias superiores já apresentam valores significativos, onde a fatia do meio apresenta valores algo superiores às outras fatias.

Concluindo verificou-se que em todos os provetes sem pré-molhagem no material cerâmico houve uma redução elevada entre a fatia da base e a fatia do meio. A pré-molhagem globalmente apresentou-se como uma boa técnica para melhorar a injectibilidade no material cerâmico.

Pelas conclusões retiradas é possível afirmar que na maioria dos casos a relação entre os dois parâmetros resultou, isto é, provou-se a viabilidade destas duas formas de estudo na avaliação da qualidade da injeção de *grouts*.

Quadro 4.3 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e os valores de injectibilidade para amostras de material calcário e cerâmico (“+” gradiente positivo e “-” gradiente negativo)

MP	Presença de água	Material	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Injectibilidade (-)
			Localização da fatia			Média	Gradiente	
			Base	Meio	Topo			
C	Seco	Calcário	2732	2693	2619	2681	-	0,82
		Cerâmico	3058	1972	1042	2024	-	0,76
	Pré-molhado	Calcário	2543	2808	2485	2612	-	0,84
		Cerâmico	2341	2415	2256	2337	-	0,81
D	Seco	Calcário	2660	2911	2521	2697	-	0,85
		Cerâmico	3127	1743	1359	2076	-	0,75
	Pré-molhado	Calcário	2629	2762	2528	2639	-	0,86
		Cerâmico	2627	2628	2501	2585	-	0,88
E	Seco	Calcário	3179	3361	3444	3328	+	0,94
		Cerâmico	3099	2310	1848	2419	-	0,84
	Pré-molhado	Calcário	3115	2958	2758	2944	-	0,83
		Cerâmico	2393	2632	2424	2483	-	0,92

## 4.5 Avaliação entre o *diagonal test* e o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

A análise individual e de comparação entre o *diagonal test* e o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons está subdividida por meio poroso, onde para cada material e para cada fatia é apresentado um valor médio. O gradiente na velocidade de ultra-sons é demonstrado a partir de sinais, com o crescimento (“+”) ou decréscimo (“-”) em altura, enquanto que para o ensaio *diagonal test* o gradiente é apresentado em MPa/m.

O Quadro 4.4 apresenta os resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e *diagonal test* para amostras de material calcário e cerâmico.

Tendo em conta a velocidade de ultra-sons, o gradiente nos dois tipos de material é em geral negativo, ou seja, em altura a velocidade diminui e por isso a compacidade também. Isto pode ser explicado, para o material cerâmico, pela observação visual das fatias, onde a parte central nas fatias do meio e do topo não foram bem preenchidas pelo *grout*, sobretudo devido à parcela de agregado fino do

meio poroso C (Figura 4.10). Este fenómeno acontece devido ao efeito de parede, o *grout* tem a tendência para circular pelas paredes porque encontra menos resistência ao escoamento.

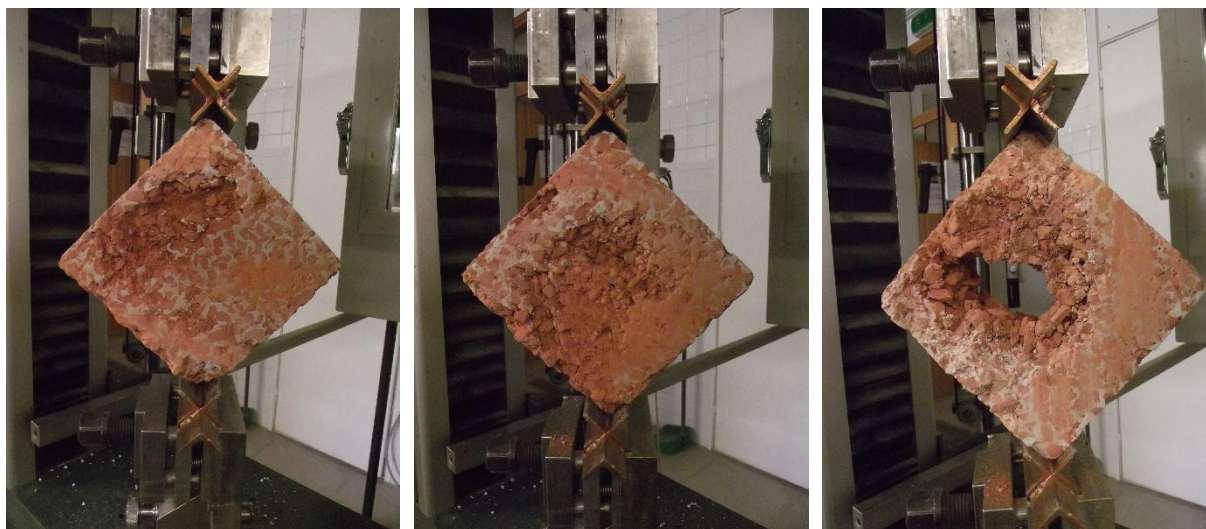


Figura 4.10 –*Diagonal test* para o material cerâmico, meio poroso C, da esquerda para a direita as fatias: base, meio e topo

No caso do *diagonal test* para os meios porosos C e D seco, a fatia da base no material cerâmico apresenta resistência muito superior devido à maior quantidade de *grout* e consequentemente as suas ligações *grout*-partícula do meio poroso têm uma resistência superior, o que não se verifica nas fatias do meio e do topo, dado que nestas fatias a injeção não ocorreu de forma a permitir o preenchimento de todos os vazios. Apenas para a fatia da base (a única completamente injectada), o valor de resistência ao corte é superior para a amostra seca (0,67 MPa) em relação à amostra pré-molhada (0,54 MPa), uma vez que na amostra seca o *grout* ao entrar em contacto com as partículas do meio poroso, absorvem parte da água do *grout* por sucção dos poros. Assim, haverá maior concentração de constituintes hidratados na amostra seca, quando comparada com a amostra pré-molhada, o que se traduz numa maior resistência mecânica [57].

Os gradientes globalmente apresentam um valor negativo no material calcário para a velocidade de ultra-sons. No meio poroso C a resistência ao corte apresenta um valor negativo de -0,51 MPa/m e o material cerâmico um gradiente negativo de -3,78 MPa/m. O valor é bastante significativo no material cerâmico devido à reduzida injeção nas fatias do meio e do topo. A velocidade de ultra-sons no meio poroso E também apresenta uma redução em altura da sua compacidade, no entanto verifica-se que é mais constante. Esta variação entre gradientes de diferentes materiais ocorre em todos os meios porosos, como é possível verificar no Quadro 4.4.

Numa análise global, é possível verificar que os valores de velocidade de propagação de ultra-sons acompanham os valores de resistência ao corte por compressão diagonal, ou seja, quanto maior a velocidade de ultra-sons, maior a resistência. Os valores baixos de velocidade de ultra-sons para o

material cerâmico nas fatias do meio e do topo são comparáveis com os baixos valores de resistência ao corte.

Verificou-se que apenas no meio poroso C a média da resistência ao corte por compressão diagonal é superior no material calcário. Este caso pode ser explicado pelo facto da parcela de partículas finas condicionar a capacidade de injeção e consequentemente a fraca compacidade e fracas ligações entre o *grout* e as partículas do meio poroso.

Em consonância com o meio poroso E seco, o meio poroso E pré-molhado apresenta gradientes inversos, o que pode parecer estranho à primeira vista. A média de velocidade de ultra-sons para o material calcário é superior à velocidade do material cerâmico conforme se tem verificado até agora, mas neste caso com o gradiente positivo para a velocidade de ultra-sons e negativo para a tensão de corte. No caso da resistência ao corte por compressão diagonal, o material cerâmico apresenta valores superiores aos valores do material calcário, apesar da massa volúmica do material cerâmico ser inferior à massa volúmica do material calcário, a resistência ao corte é superior. A explicação passa pela real importância das ligações entre o *grout* e as partículas do meio poroso e também o imbricamento entre partículas. Este caso é esclarecedor da demonstração da grande importância destas ligações. As partículas de ligante que conseguem entrar dentro dos poros do material cerâmico são também importantes na criação destas ligações. Na resistência ao corte importa ter ainda em conta o imbricamento entre as partículas do meio poroso e o *grout* e a forma como elas estão dispostas a resistir um esforço de corte.

Nas amostras pré-molhadas o gradiente para ambos os ensaios é globalmente negativo, principalmente na avaliação de resistência ao corte, pois as fatias superiores apresentam menor concentração de ligante aquando a injeção, tal deve-se à presença de água livre nos vazios. Consequentemente verifica-se uma instabilidade no *grout* injectado, havendo uma deposição das partículas sólidas do *grout*, ficando assim as zonas superiores com menor quantidade ligante.

Após esta análise é possível afirmar que globalmente os dois ensaios (ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e *diagonal test*) seguem uma tendência muito semelhante.

A comparação entre o tipo de material, meios porosos e seco ou molhado para o *diagonal test* será vista mais à frente em 4.7.

Quadro 4.4 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e o *diagonal test* para amostras de material calcário e cerâmico

MP	Presença de água	Material	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência ao corte por compressão diagonal [MPa]				
			Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
			Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
C	Seco	Calcário	2732	2693	2619	2681	-	0,42	0,52	0,34	0,43	-0,51
		Cerâmico	3058	1972	1042	2024	-	0,67	0,05	0,06	0,26	-3,78
	Pré-molhado	Calcário	2543	2808	2485	2612	-	0,52	0,49	0,22	0,41	-1,85
		Cerâmico	2341	2415	2256	2337	-	0,54	0,44	0,17	0,39	-2,29
D	Seco	Calcário	2660	2911	2521	2697	-	0,39	0,49	0,55	0,48	0,95
		Cerâmico	3127	1743	1359	2076	-	1,12	1,07	0,16	0,78	-0,32
	Pré-molhado	Calcário	2629	2762	2528	2639	-	0,80	0,73	0,36	0,63	-2,74
		Cerâmico	2627	2628	2501	2585	-	1,08	1,14	0,82	1,01	-1,61
E	Seco	Calcário	3179	3361	3444	3328	+	0,89	0,81	0,74	0,82	-0,93
		Cerâmico	3099	2310	1848	2419	-	1,18	0,47	0,10	0,58	-4,45
	Pré-molhado	Calcário	3115	2958	2758	2944	-	0,79	0,76	0,34	0,63	-2,82
		Cerâmico	2393	2632	2424	2483	-	0,98	1,11	1,00	1,03	0,78

## 4.6 Avaliação entre o ensaio de corte directo e o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Após a avaliação entre o *diagonal test* e o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, realiza-se uma avaliação com outro ensaio mecânico, o ensaio de corte directo.

Em todos os meios porosos verifica-se a mesma tendência quanto aos materiais, onde o material calcário apresenta maior velocidade de ultra-sons em comparação com o material cerâmico.

No meio poroso C (Quadro 4.5) o gradiente para os dois materiais e para os dois ensaios são negativos, uma vez que em altura a compacidade diminui.

Em todos os meios porosos, a base do material cerâmico apresenta para estes parâmetros valores elevados em relação às outras duas fatias, sendo assim constata-se mais uma vez a dificuldade que o *grout* enfrenta quando o meio poroso se apresenta seco.

A resistência ao corte directo no material cerâmico para o meio poroso C na base, verifica-se que apresenta um valor elevado, que seria semelhante nas outras fatias se houvesse uma injeção completamente eficiente. No material cerâmico existe uma boa coesão, conforme o verificado na base que permite um bom valor de resistência ao corte, no entanto apenas quando a injeção é completa.

A relação entre estes dois ensaios é muito semelhante. No entanto, no material cerâmico para todos os meios porosos pré-molhados não se verifica tanta simetria. Isto é, apesar da boa capacidade de resistência ao corte, não apresentam elevada compacidade. Desta forma é de salientar a qualidade das ligações entre o *grout* e as partículas do meio poroso nestes resultados.

Em relação ao meio poroso D (Quadro 4.5) pode-se visualizar que os gradientes para o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e o ensaio de corte directo apresentam globalmente sinais



contrários negativo e positivo, respectivamente. Os valores de gradiente de resistência ao corte estão em valores aproximados a 1, apenas no estado pré-molhado para o material calcário com um valor negativo de -0,79.

Na fatia do topo não se apresenta um valor para ambos ensaios pois esta parte do provete quase não foi preenchida por *grout* e por esse motivo não foi possível a avaliação desta fatia.

Nos valores retirados a partir do ensaio de corte directo pode-se observar que são números muito semelhantes. De realçar que apesar da baixa compacidade da fatia do meio para o material cerâmico, a mesma apresenta uma boa resistência ao corte que permite ressaltar a importância das ligações entre o *grout* e os partículas do meio poroso.

Ainda para valores médios no ensaio de corte directo, o valor para o material cerâmico no estado pré-molhado é o duas vezes superior aos outros valores do meio poroso D.

Tendo uma análise específica para o material cerâmico, principalmente para as fatias do meio e do topo, estas apresentam um valor baixo de velocidade de ultra-sons, ou seja, reduzido volume de *grout* e baixa compacidade. Por outro lado, apresentam extraordinariamente um valor de resistência ao corte muito elevado, que mais uma vez justifica-se pela excelente ligação entre o *grout* e os partículas do meio poroso e o imbricamento entre partículas. Estas ligações podem ser: físicas ou mecânicas, criadas principalmente devido à absorção das partículas do agregado, onde os cristais provenientes das componentes hidratadas implementam uma boa aderência entre o *grout* e as partículas do meio poroso; químicas, onde o agregado liberta iões que combinam com os iões provindos da hidratação do ligante que formam ligações por deposições dos componentes hidratadas; e epitáxicas que são formadas por constituintes hidratados do *grout* que formam cristais com continuidade entre as partículas de ligante e do meio poroso [57].

O gradiente para o material calcário para o meio poroso E no estado seco apresenta-se com um sinal positivo para velocidade de ultra-sons e com sinal contrário mas reduzido para o ensaio de corte directo. Ainda outra amostra que não segue os mesmos sinais para os dois ensaios, é a amostra pré-molhada do material cerâmica, onde o gradiente da velocidade é negativo e no ensaio mecânico positivo com 1,87.

A velocidade de ultra-sons para o material calcário para todas as fatias apresenta-se bastante elevado, o que se traduz na excelente compacidade. Já o material cerâmico apresenta a mesma tendência onde a fatia da base apresenta uma maior velocidade que as restantes.

No meio poroso E seco aparenta ser estranho os reduzidos valores de resistência ao corte para o material cerâmico que apresenta menos de metade da resistência do material calcário, mas pode-se explicar pela fraca injeção.

Em relação ao ensaio de corte directo, o material calcário no meio poroso E pré-molhado apresenta um valor significativo, mas não superior ao material cerâmico onde este já apresenta valores expectáveis (contrários ao estado seco) com um valor médio de resistência ao corte de 0,82.

Concluindo que a resistência ao corte para o material cerâmico, quando a amostra está bem injectada, é superior aos valores do material calcário. O material cerâmico apresenta melhores ligações mecânicas e assim excelentes ligações *grout*-partícula do meio poroso, não esquecendo que se o volume de vazios for elevado estes valores diminuem muito, como é o caso do meio poroso C seco.

Quadro 4.5 - Resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e o ensaio de corte directo para amostras de material calcário e cerâmico

MP	Presença de água	Material	Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência ao corte directo [MPa]				
			Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
			Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
C	Seco	Calcário	2732	2693	2619	2681	-	1,01	1,05	0,68	0,92	-2,10
		Cerâmico	3058	1972	1042	2024	-	0,36	0,17	0,15	0,22	-1,32
	Pré-molhado	Calcário	2543	2808	2485	2612	-	0,60	0,64	0,39	0,55	-1,28
		Cerâmico	2341	2415	2256	2337	-	0,92	0,52	0,23	0,56	-4,33
D	Seco	Calcário	2660	2911	2521	2697	-	0,46	0,66	0,62	0,58	0,99
		Cerâmico	3127	1743	1359	2076	-	0,49	0,65	-	0,57	0,97
	Pré-molhado	Calcário	2629	2762	2528	2639	-	0,47	0,63	0,35	0,48	-0,79
		Cerâmico	2627	2628	2501	2585	-	1,06	1,21	0,93	1,07	0,98
E	Seco	Calcário	3179	3361	3444	3328	+	0,56	0,84	0,61	0,67	0,30
		Cerâmico	3099	2310	1848	2419	-	0,29	0,23	0,10	0,21	-0,37
	Pré-molhado	Calcário	3115	2958	2758	2944	-	0,70	0,66	0,28	0,55	-2,65
		Cerâmico	2393	2632	2424	2483	-	0,79	1,09	0,57	0,82	1,87

## 4.7 Diagonal Test

O *diagonal test* apresenta-se como um ensaio que provoca acções de corte por compressão diagonal como foi apresentado em 3.7.1. Em seguida apresenta-se dois sub-capítulos onde se compara entre o material calcário e o material cerâmico entre os três tipos de meio poroso (C, D e E) e em ambos os sub-capítulos uma análise da existência ou não de água aquando a injeção de *grout*.

### 4.7.1 Comparação entre material

Na comparação representada na Figura 4.11 entre material calcário e o material cerâmico utilizou-se como variação os meios porosos C, D e E.

Os valores de resistência ao corte por compressão diagonal no estado seco para o meio poroso C e E, no material calcário apresentam resistência superior ao valor do material cerâmico. Enquanto que no meio poroso D este valor para o material cerâmico é superior ao valor do material calcário. O valor no meio poroso E para o material cerâmico é estranhamente inferior pois as fatias superiores apresentam muitos vazios, principalmente a fatia do topo porque apresenta uma velocidade de ultra-sons abaixo dos 2000 m/s e uma tensão de corte de 0,10 MPa, quando a média é de 0,58 MPa (Quadro 4.4).

Nos estudos realizados em capítulos anteriores verificou-se que a característica mais importante é a ligação entre as partículas do meio poroso e o *grout*. Estas ligações são melhores no material cerâmico, pois existe melhor coesão mecânica na interface entre o *grout* e a partícula do meio poroso,

já que o ângulo de contacto é inferior (Quadro 2.3), ou seja, existe maior afinidade com superfície polar das partículas [1].

Na Figura 4.11 é possível verificar que apenas para o meio poroso D a resistência ao corte por compressão diagonal é superior, isto pode ser explicado pelo facto desta análise ser feita com uma média do provete inteiro, o que se verifica para o material cerâmico quando está seco. Estes resultados apresentam principalmente para a fatia do meio e do topo reduzida compacidade que afecta a média do provete.

Na avaliação de resultados entre o material seco e o pré-molhado é interessante principalmente perceber como evoluem no material cerâmico, devido aos diferentes comportamentos em cada caso.

Agora para o estudo entre o material calcário e o material cerâmico com pré-molhagem, apresentam valores semelhantes para o meio poroso C e como seria de esperar para os meios porosos sem partículas finas, meios porosos D e E, onde o material cerâmico tem valores superiores de resistência ao corte. Tal facto acontece devido à melhor injectibilidade do material cerâmico aquando a injeção com pré-molhagem, como por exemplo, para o meio poroso D seco e pré-molhado com valores, respectivamente, 0,75 e 0,88 (Quadro 4.1). Pode ser explicado pela menor quantidade de água perdida do *grout* quando a injeção ocorre com a pré-molhagem.

Apesar do material calcário apresentar maior massa volúmica, o material cerâmico apresenta melhores ligações *grout*-partícula do meio poroso e maior imbricamento entre partículas, garantindo melhor comportamento ao esforço de corte.

Em relação ao material cerâmico é muito fácil perceber observando a Figura 4.11 que a pré-molhagem melhora as resistências ao corte entre 20% a 30%. Tal pode ser explicado no meio poroso pré-molhado pelo constante escoamento do *grout*, já que no meio poroso seco tal não acontece devido à perda de água da suspensão aquosa e consequentemente condicionamento do escoamento. Neste caso as amostras com pré-molhagem apresentarem melhor resistência mecânica, o que não seria expectável pois a maior quantidade de água deteriora as ligações entre o *grout* e as partículas do meio poroso (na verdade provoca o contrário), apenas melhora a capacidade de injeção e a quantidade de *grout* injectado. Isto é, o *grout* no meio poroso pré-molhado consegue circular mais facilmente, permitindo uma maior quantidade de *grout* injectado quando comparado com a amostra seca.

De referir que o aumento de resistência ao corte do meio poroso C para o meio poroso D põe em foco a dificuldade de criação de ligações *grout*-partícula do meio poroso quando o meio poroso apresenta partículas finas como o meio poroso C. Neste caso os parâmetros de resistência ao corte melhoram com a pré-molhagem pois o volume de *grout* aumenta substancialmente.

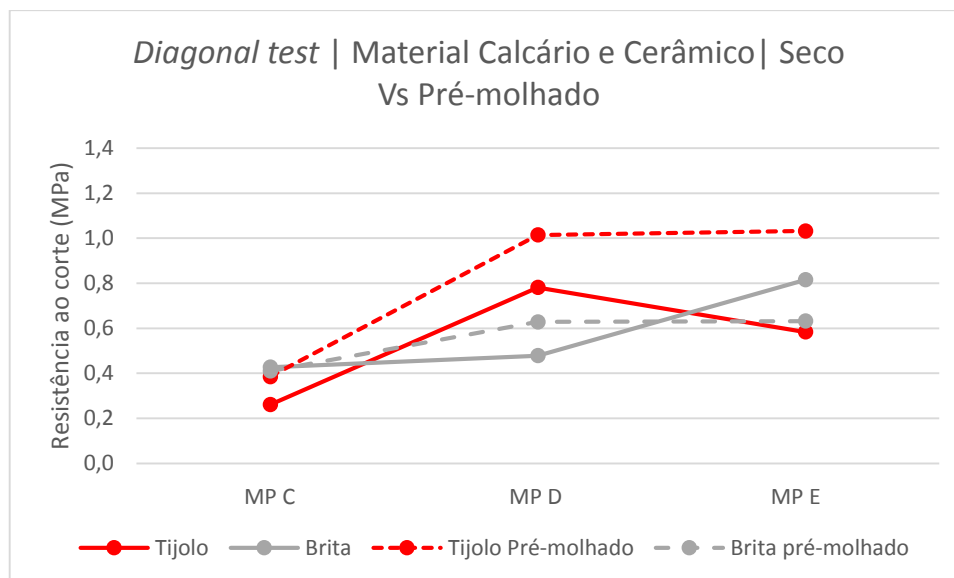


Figura 4.11 - *Diagonal test* para material calcário e cerâmico para cada meio poroso para seco ou pré-molhado

#### 4.7.2 Comparação entre meio poroso

Neste sub-capítulo analisa-se para cada material os três meios porosos em altura, ou seja, em cada fatia (Figura 4.12).

O material calcário apresenta como observou-se anteriormente valores interessantes com a mesma tendência nos resultados entre a velocidade de propagação de ultra-sons e o *diagonal test*, principalmente para o meio poroso C.

O meio poroso C e D têm valores de resistência ao corte muito semelhantes para as fatias da base e do meio, enquanto que o valor no topo decresce para o meio poroso C, a amostra do meio poroso apresenta um declive constante e positivo.

O meio poroso E apresenta um declive inverso mas constante, tal como quando o meio poroso foi pré-molhado (Figura 4.12).

Tendo em conta a mesma análise mas para um meio poroso pré-molhado (Figura 4.12), verifica-se que os troços de rectas são muito semelhantes em todos os meios porosos com valores negativos de declive, ou seja, apresentam a mesma tendência. Verificando-se menor resistência ao corte na fatia superior em relação às fatias inferiores.

Este caso pode ser explicado por um motivo visível em laboratório aquando a injeção. Durante a injeção o *grout* circula e sobe pelo meio poroso transportando parte da água da pré-molhagem que não se instalou nas superfícies das partículas do meio poroso. Esta água sobe até à parte superior do modelo provocando uma menor concentração de ligante, como é possível verificar na Figura 4.13.

Os valores para o meio poroso D e E são muito semelhantes e superiores ao meio poroso C, pois os meios porosos D e E apresentam menor número de interfaces e maior abertura equivalente de vazios como mostra o Quadro 4.6, resultando numa maior resistência global [13].

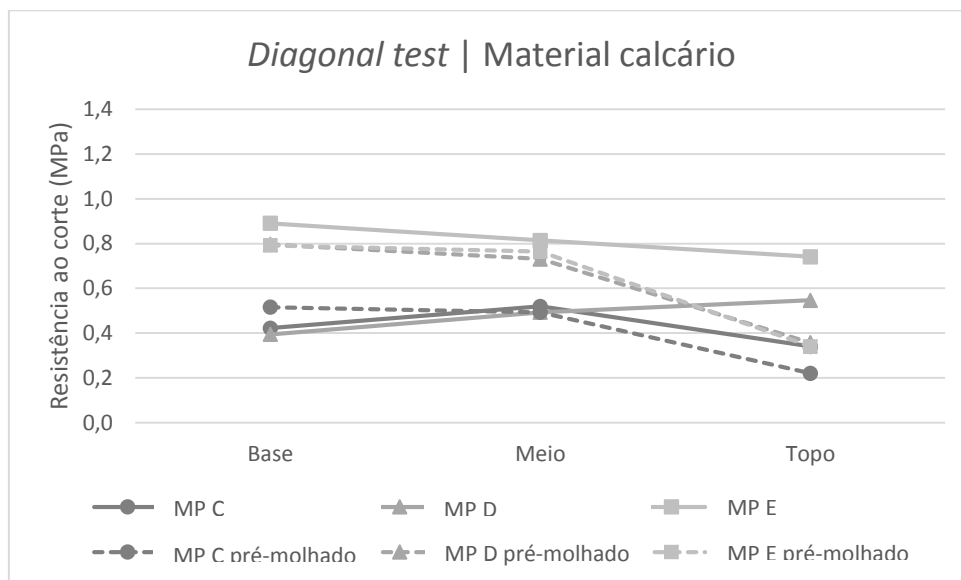


Figura 4.12 – *Diagonal test* para material calcário para cada meio poroso tendo em conta cada fatia



Figura 4.13– Provete inteiro de material calcário do meio poroso D com pré-molhagem

Quadro 4.6 – Abertura equivalente dos meio poroso [13]

Meio Poroso	Material	$b_{eqv}(mm)$
C	Calcário	1,45
	Cerâmico	1,56
D	Calcário	1,80
	Cerâmico	2,23
E	Calcário	2,44
	Cerâmico	2,44

Analisando o material cerâmico para o material seco (Figura 4.14), observa-se uma elevada redução da resistência ao corte em altura devido à fraca compactidade das fatias do meio e topo,

principalmente na fatia do topo onde é quase nula. Tal acontece devido à redução de água no *grout* em altura absorvida pelos vazios do meio poroso. Esta redução de fluidez provoca obstruções, preferencialmente na parte interior do meio poroso pois o *grout* tem a tendência de circular pelas paredes devido ao efeito de parede, como mostra a Figura 4.10.

O material cerâmico pré-molhado (Figura 4.14) apresenta para o meio poroso D e E valores muitos superiores aos valores do meio poroso C. Observando o gráfico da Figura 4.14, verificando no primeiro troço um declive positivo e o segundo declive negativo, mas sem se aproximar com o caso seco.

Os valores de resistência ao corte são superiores quando o material cerâmico é injectado com uma pré-molhagem.

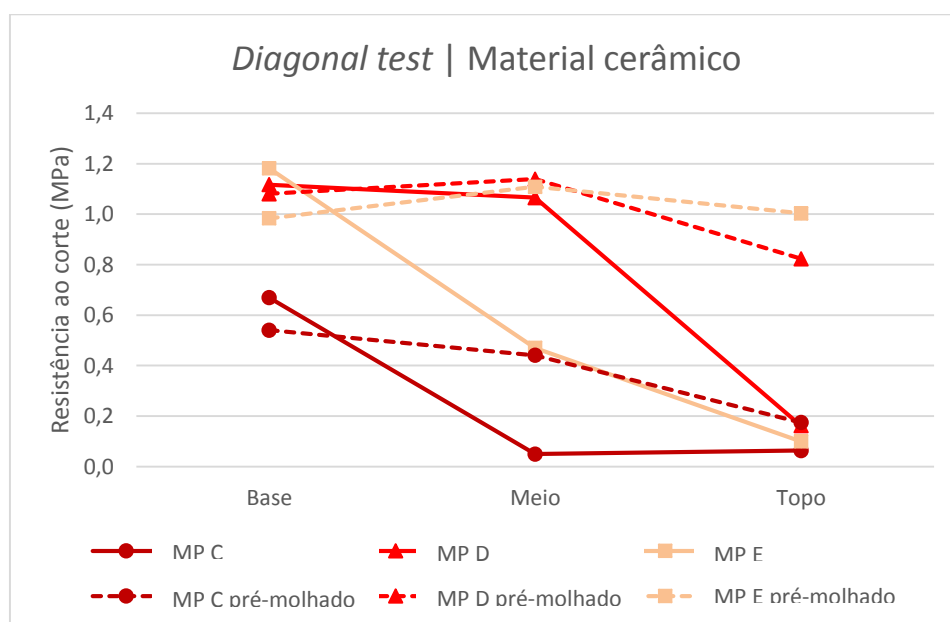


Figura 4.14 - *Diagonal test* para material cerâmico para cada meio poroso tendo em conta cada fatia

## 4.8 Ensaio de corte directo

O ensaio de corte directo apresenta-se como um ensaio que provoca ações de corte como foi apresentado em 3.7.2, em seguida, tal como para o *diagonal test* apresenta-se três sub-capítulos onde se compara o material entre o material calcário e o material cerâmico, entre os três tipos de meio poroso (C, D e E) e finalmente a comparação entre a existência ou não de água a quando a injeção de *grout*.

Esta avaliação de resultados é muito semelhante aos representados para o *diagonal test* e por vezes fará sentido comparar com os valores do *diagonal test*.

### 4.8.1 Comparação entre material

Na comparação representada na Figura 4.15 entre material calcário e o material cerâmico utilizou-se como variação os meios porosos C, D e E no estado seco.

A resistência ao corte para o meio poroso C e E, no material calcário têm resistência superior ao valor do material cerâmico. Enquanto que no meio poroso D este valor para o material cerâmico é aproximadamente igual ao valor do material calcário.

Novamente no material cerâmico no estado seco houve problemas de injeção que fizeram com que o provete apresenta-se fraca injectibilidade e por isso reduzida compacidade, que levou a apresentar pouca resistência ao corte.

No estudo entre o material calcário e o material cerâmico com pré-molhagem, apresentada na Figura 4.14 os valores semelhantes para o meio poroso C. Já nos meios porosos D e E, o material cerâmico tem valores muito superiores de resistência ao corte. Uma explicação para a melhor resistência ao corte no material cerâmico quando comparado com o material calcário está ligado com uma componente química, dado que as partículas do material cerâmico libertam iões que combinam com os iões do *grout* provindos da hidratação, formando ligações por deposição das componentes da hidratação, assim estabelecem-se “conexões físicas”. O material calcário não liberta tantos iões e por isso não existe este tipo de ligações [1].

O meio poroso D no material calcário apresenta para a presença ou ausência de água valores semelhantes. Ainda no material calcário todos os meios porosos apresentam piores valores para a pré-molhagem. Mas sendo natural a presença de água deteriorar a resistência ao corte num material tão denso como o material calcário. Ainda de referir que o meio poroso pré-melhor mais resistente é o meio poroso D, em ambos os materiais com a particularidade do meio poroso E para o material calcário apresentar baixa resistência ao corte.

Tal como tinha acontecido no *diagonal test*, no material cerâmico é muito fácil perceber observando a Figura 4.14 que a pré-molhagem melhora as resistências ao corte em entre 40% a 60% (ainda superior aos 20 % a 30% dos valores do *diagonal test*), pode ser explicado no meio poroso pré-molhado pelo constante escoamento do *grout* à medida que preenche o meio poroso e consegue chegar a todas as zonas. Aumentando a compacidade e conseguindo criar as ligações *grout*-partícula do meio poroso. Isto não acontece no meio poroso seco devido à perda de água da suspensão aquosa que interrompe o escoamento.

Concluindo o mesmo no *diagonal test*, o aumento de resistência ao corte do meio poroso C para o meio poroso D, põe em foco a dificuldade de criação de ligações *grout*-partícula do meio poroso quando o meio poroso apresenta partículas finas como o meio poroso C, principalmente devido à menor quantidade de volume injectado.

Mais uma vez importa referir que para o material cerâmico, o uso da técnica de pré-molhagem *a priori* numa acção de consolidação de uma alvenaria como a injeção de *grouts*, pois aumenta a quantidade de *grout* injectado e assim melhora a resistência do núcleo a esforços de corte. Tal acontece porque a injectibilidade no material calcário quando foi pré-molhado aumentou. Ainda assim importa referir que alguns autores aconselham alguma precaução ([58] e [26]).

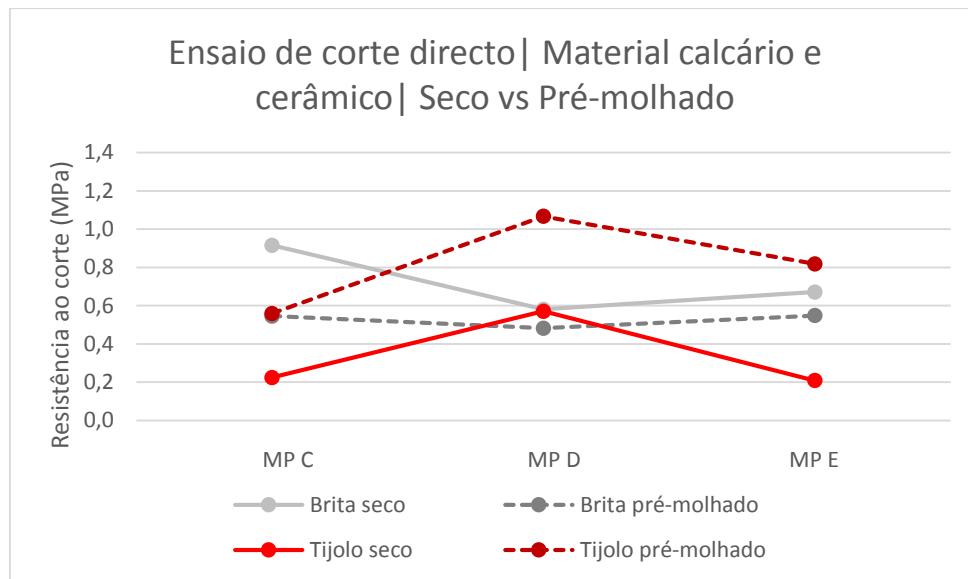


Figura 4.15 – Ensaio de corte directo para material calcário para cada meio poroso para seco ou pré-molhado

#### 4.8.2 Comparação entre meio poroso

Este gráfico da Figura 4.16 é bastante interessante pois apresenta a mesma tendência entre meio poroso do mesmo estado referente à presença da água, excepto o valor para o meio poroso C seco que é muito semelhante ao valor do meio poroso D.

Neste caso para o estado seco, a relação com o *diagonal test* não é muito linear, onde o meio poroso mais resistente era o meio poroso E e para a base mais resistente é o meio poroso que normalmente é inferior, o meio poroso C.

Realizando a mesma análise mas para um meio poroso pré-molhado (Figura 4.16), verifica-se que o primeiro troço para todos os meios porosos é constante e semelhante em termos de declive com o *diagonal test*. No segundo troço os valores entre os meios porosos são muito semelhantes, principalmente na fatia do meio.



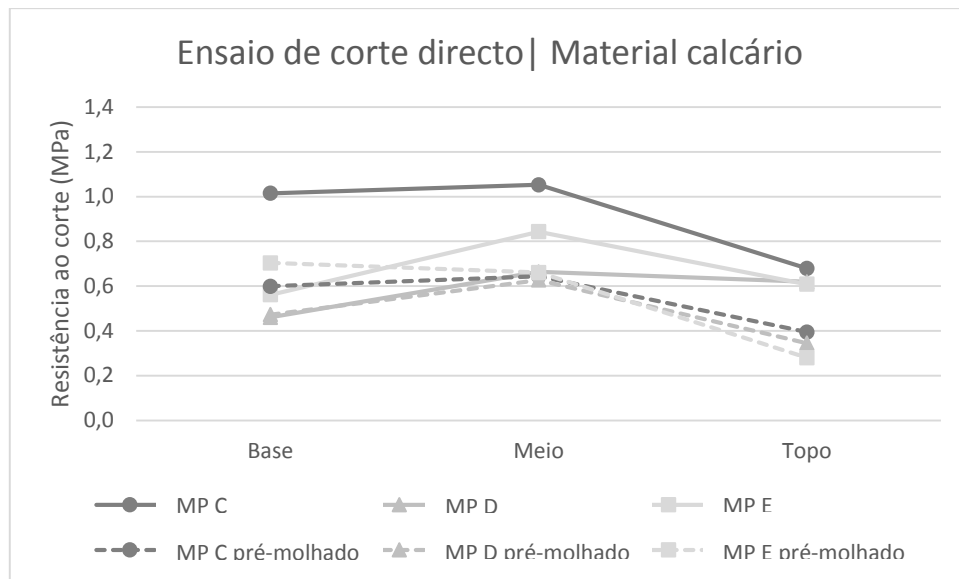


Figura 4.16 – Ensaio de corte directo para material calcário seco para cada meio poroso tendo em conta cada fatia

Tendo em conta o material cerâmico para o meio poroso seco (Figura 4.17), observa-se uma redução de resistência ao corte em altura devido à fraca compactidade (principalmente na fatia do topo), que como se viu anteriormente acontece devido à redução de água no *grout* em altura absorvida pelos vazios do meio poroso, provocando bloqueios e deficiente preenchimento de *grout* nas zonas mais afastadas do ponto de injeção.

Tal como no *diagonal test*, neste caso existe apenas uma pequena nuance, onde no meio poroso D tem valores superiores em relação ao meio poroso E, especialmente na fatia do meio, pois o *grout* não preencheu correctamente até esta fatia.

O material cerâmico pré-molhado (Figura 4.17) apresenta para o meio poroso D e E valores semelhantes e muitos superiores aos valores do meio poroso C nas fatias superiores que pode ser explicado pela menor capacidade de ligação *grout*-partícula do meio poroso, causada pela existência da parcela de partículas finas no meio poroso C.

Nos meios poros D e E em altura no primeiro troço tem declive positivo e o segundo declive negativo, já o meio poroso C é sempre negativo. Os valores de resistência ao corte são superiores quando o material cerâmico é injectado com uma pré-molhagem.

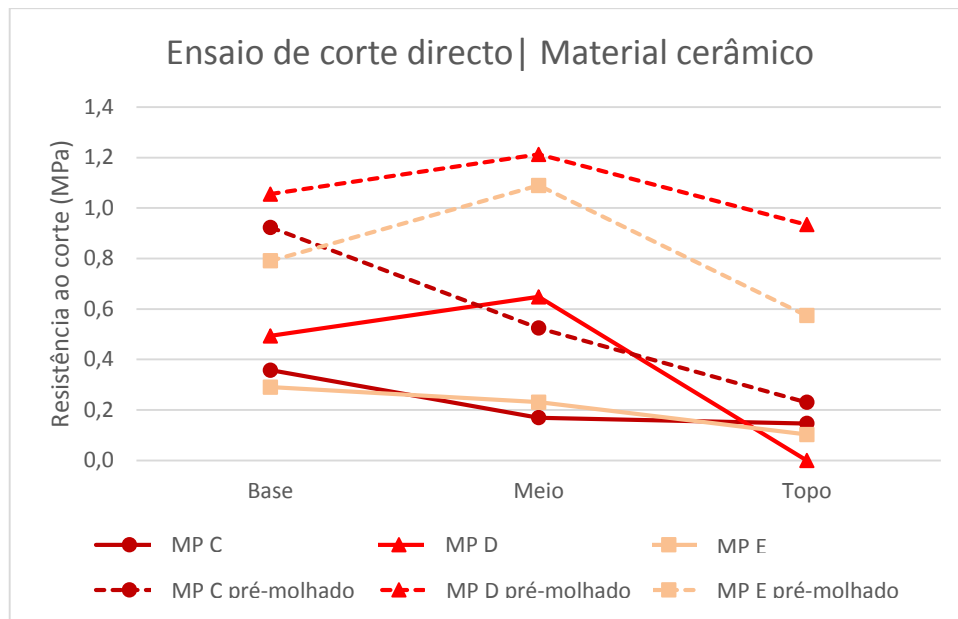


Figura 4.17 – Ensaio de corte directo para material cerâmico para cada meio poroso tendo em conta cada fatia

## 4.9 Avaliação e comparação entre *diagonal test* e ensaio de corte directo

Este sub-capítulo compreende a análise de comparação entre o *diagonal test* e o ensaio de corte directo, ambos avaliam a capacidade de resistência ao corte. Nos dois gráficos seguintes apresentam-se para cada material (calcário ou cerâmico), os vários meios porosos relativos à presença de água.

Na Figura 4.18 verifica-se que para o meio poroso C todos os valores estão próximos, apenas o valor de ensaio de corte directo para o estado seco é superior. No meio poroso D também com valores próximos. No meio poroso E os valores do *diagonal test* apresentam-se superiores em relação ao ensaio de corte directo. Ainda no meio poroso E, como se viu anteriormente, verifica-se valores superiores para o estado seco, pois o material calcário não absorve água devido à reduzida porosidade. Também é importante não esquecer que parte dessa água pode permanecer em zonas onde o *grout* poderia preencher.

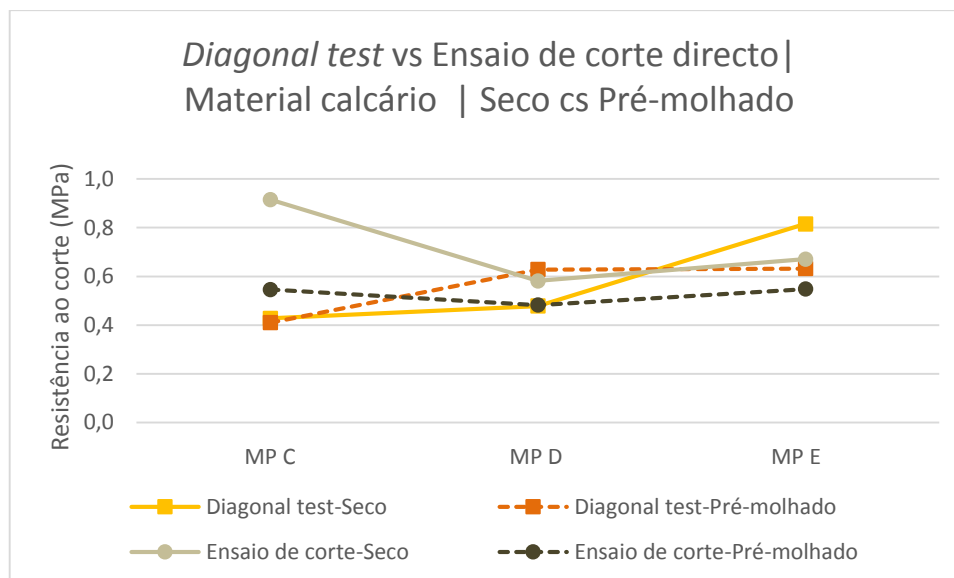


Figura 4.18 – *Diagonal test* e Ensaio de corte directo para material calcário para cada meio poroso para seco ou pré-molhado

Numa análise global para o material cerâmico (Figura 4.19) verifica-se a mesma tendência para os mesmos ensaios e para o mesmo estado em relação à presença de água. Onde o meio poroso D apresenta-se como o meio poroso mais resistente.

Avaliando os meios porosos, verifica-se que o meio poroso C apresenta, em geral, menor resistência ao corte devido à presença de partículas finas na sua constituição. Ora se apresentam uma parcela de finos, a sua superfície específica será superior e por isso haverá maior necessidade de água para preencher toda a superfície das partículas, afectando o processo de hidratação e assim a resistência ao corte será inferior.

Os valores superiores para a resistência ao corte por ordem crescente apresentam a seguinte sequência o meio poroso C, E e finalmente D. Ainda na análise de meios porosos é possível verificar maior discrepância entre valores quando comparado com o material calcário.

Em relação à presença de água pode-se retirar uma tendência, os valores para o material pré-molhado são superiores aos valores no estado seco, com a menor diferença para o meio poroso C e maior para o meio poroso E, pois a abertura equivalente de vazios é superior para o E [13].

Os meios porosos pré-molhados apresentam maior ângulo de contacto Quadro 2.3, o que facilita o melhor preenchimento de vazios e por sua vez maior compacidade, por este motivo verifica-se maior resistência ao corte para o material cerâmico quando este é pré-molhado.

No estado seco verifica-se que os valores para o *diagonal test* são superiores aos valores relativos ao ensaio de corte directo, enquanto nos meios porosos pré-molhados o ensaio de corte directo apresenta valores superiores em relação ao *diagonal test*, exceptuando para o meio poroso E.

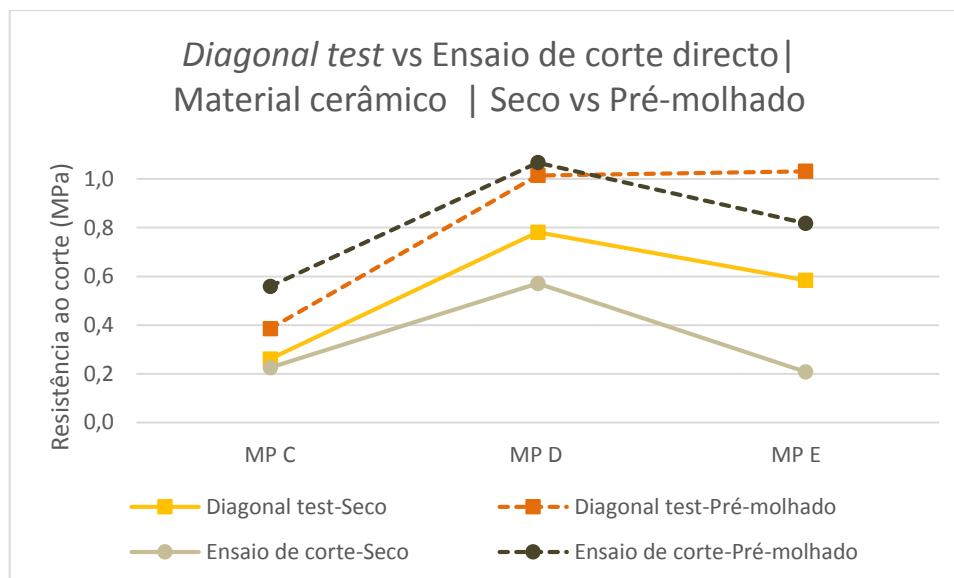


Figura 4.19 – *Diagonal test* e Ensaio de corte directo para material cerâmico para cada meio poroso para seco ou pré-molhado

## 4.10 Avaliação e comparação entre ensaios de corte e ensaio de tracção por compressão diametral

De modo a perceber a relação existente entre a análise de corte e a análise de tracção, de seguida será apresentado a comparação entre os dois ensaios mecânicos de análise de corte, *diagonal test* e ensaio de corte directo, com o ensaio de tracção por compressão diametral.

Os resultados do ensaio de tracção por compressão diametral foram extraídos da dissertação de mestrado de Coelho [41], onde avaliou este parâmetro a partir de fatias cilíndricas com cerca de 15 cm de diâmetro e 8 cm de altura.

Tal como para os dois ensaios de análise ao corte, o ensaio de tracção por compressão diametral apresenta um gradiente que avalia o desenvolvimento da resistência em altura.

No meio poroso C (Quadro 4.7) nos três ensaios verifica-se que o gradiente é negativo mas com maior valor para o material cerâmico devido à menor compacidade das fatias superiores (Figura 4.10), pois o *grout* à medida que vai subindo vai perdendo água livre para os poros existentes no material cerâmico devido às fortes forças de atração. Esta redução de água livre provoca menor fluidez, formando obstruções e o *grout* não preenche todos os vazios.

Contrariamente ao que acontece nos ensaios relativos à análise ao corte no meio poroso C, no ensaio de tracção por compressão diametral o material cerâmico apresentam melhor resistência. Esta resistência à tracção apresenta-se para todos os meios porosos superior para o material cerâmico em relação ao material calcário.

Tendo em conta a pré-molhagem no meio poro C tal como no estado seco apresenta para o gradiente valores negativos com maior valor para o material cerâmico.

Os valores dos ensaios relativos à análise de corte no meio poroso C apresentam valores muito semelhantes entre os dois tipos de material, enquanto que na análise à tracção o material cerâmico apresenta quase o dobro de resistência, pode ser explicado pelas melhores ligações entre o *grout* e as partículas do meio poroso.

No meio poroso D e contrariamente ao que acontece no meio poroso C, a grande parte das amostras com o gradiente para todos os ensaios é positivo, ou seja, em altura a resistência ao corte e à tração aumenta. O sinal positivo do gradiente representa a melhor capacidade de injeção quando o meio poroso se encontra molhado pois o ângulo de contacto é superior como se pode verificar no Quadro 2.3. Apenas o material calcário pré-molhado apresenta para todos os ensaios gradiente negativo.

A resistência ao corte com o ensaio de corte directo apresenta valores semelhantes para os dois tipos de materiais, enquanto que os valores para o *diagonal test* e para o ensaio de tracção por compressão diametral apresenta valores superiores para o material cerâmico em relação ao material calcário, apenas para o estado seco do meio poroso D.

O material cerâmico pré-molhado apresenta para todos os meios porosos, resistência superior ao material calcário, uma vez que o *grout* consegue entrar nos poros e fornece uma boa ligação *grout-partícula* do meio poroso. Em especial a análise ao corte apresenta um valor bastante elevado no material cerâmico em relação à análise à tracção.

O meio poroso E seco apresenta um gradiente negativo para os dois materiais no *diagonal test*, principalmente no material cerâmico onde é muito elevado devido à reduzida compacidade. No ensaio de corte directo o gradiente para o material calcário é positivo e para o material cerâmico negativo, já no ensaio de tracção por compressão em ambos com gradiente positivos.

A pré-molhagem no meio poroso apresenta um gradiente para o material calcário negativo, enquanto que para o gradiente do material cerâmico apresenta valores positivos para os ensaios de análise ao corte como se viu anteriormente sempre que o meio poroso encontra-se molhado, excepto para o ensaio de tracção por compressão diametral.

Em geral pode-se afirmar que no material cerâmico as resistências mecânicas são superiores para as amostras pré-molhadas do que para as amostras secas. Pois o volume de *grout* injectado é superior nas pré-molhadas, apesar de nestas amostras haver maior dificuldade de penetração de CO<sub>2</sub> e por isso existe um atraso no endurecimento da cal hidráulica (por carbonatação) e que levaria a uma menor resistência global [59].

Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios: *diagonal test*, ensaio de corte directo e ensaio de tracção por compressão diametral para amostras de material calcário e material cerâmico

MP	Presença de água	Material	Resistência ao corte por compressão diagonal [MPa]		Resistência ao corte directo [MPa]		Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]	
			Média	Gradiente [Mpa/m]	Média	Gradiente [Mpa/m]	Média	Gradiente [MPa/m]
C	Seco	Calcário	0,43	-0,51	0,92	-2,10	0,17	-0,06
		Cerâmico	0,26	-3,78	0,22	-1,32	0,31	-1,88
	Pré-molhado	Calcário	0,41	-1,85	0,55	-1,28	0,17	-0,50
		Cerâmico	0,39	-2,29	0,56	-4,33	0,30	-1,56
D	Seco	Calcário	0,48	0,95	0,58	0,99	0,32	0,50
		Cerâmico	0,78	-0,32	0,57	0,97	0,52	0,69
	Pré-molhado	Calcário	0,63	-2,74	0,48	-0,79	0,36	-0,44
		Cerâmico	1,01	0,36	1,07	0,98	0,53	0,00
E	Seco	Calcário	0,82	-0,93	0,67	0,30	0,58	1,50
		Cerâmico	0,58	-4,45	0,21	-0,37	0,58	1,13
	Pré-molhado	Calcário	0,63	-2,82	0,55	-2,65	0,46	-0,81
		Cerâmico	1,03	0,78	0,82	1,87	0,62	-0,38

## 4.11 Análise complementar do *diagonal test* para a ASTM e para a RILEM

Este capítulo apresenta-se como análise complementar com intuito de perceber que tendências o *diagonal test* com a norma ASTM e com a especificação RILEM apresenta quando comparado com o ensaio de corte directo e o ensaio de tracção por compressão diametral.

### 4.11.1 Comparação com o ensaio de corte directo

No material calcário no estado seco (Figura 4.20) é possível observar para todos os parâmetros valores inferiores para o meio poroso C e superiores para o meio poroso E. Claramente que os valores do *diagonal test* para a RILEM em todos os meios porosos são superiores e nos meios porosos C e D os valores do *diagonal test* para a ASTM são inferiores aos valores do ensaio de corte directo, enquanto que no meio poroso E acontece o contrário. Comparando ainda o ensaio de corte directo com o *diagonal test* da ASTM é possível verificar que existe maior semelhança do que comparando com o *diagonal test* da RILEM.

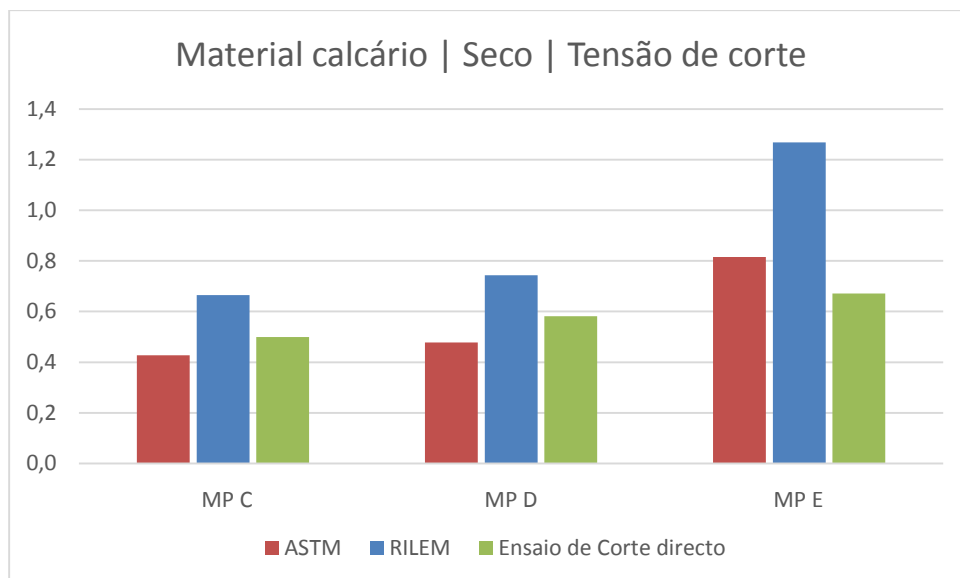


Figura 4.20 – Comparação do *diagonal test* com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material calcário no estado seco

Tendo em conta o material calcário com pré-molhagem (Figura 4.21) é possível verificar mais uma vez que a RILEM apresenta valores muito superiores em relação aos outros dois parâmetros. Os valores para o meio poroso D e para o meio poroso E são muito semelhantes e superiores ao meio poroso C pois este apresenta partículas finas.

Os valores de *diagonal test* para a norma ASTM são muito semelhantes aos valores do ensaio de corte directo, mas inferiores no meio poroso C e superiores nos meios porosos D e E.

Comparando o meio poroso seco com o meio poroso pré-molhado destaca-se no meio poroso D para os dois valores de *diagonal test* maior resistência no pré-molhado, no material calcário isto não seria expectável porque a presença de água tem tendência a reduzir a resistência ao corte.

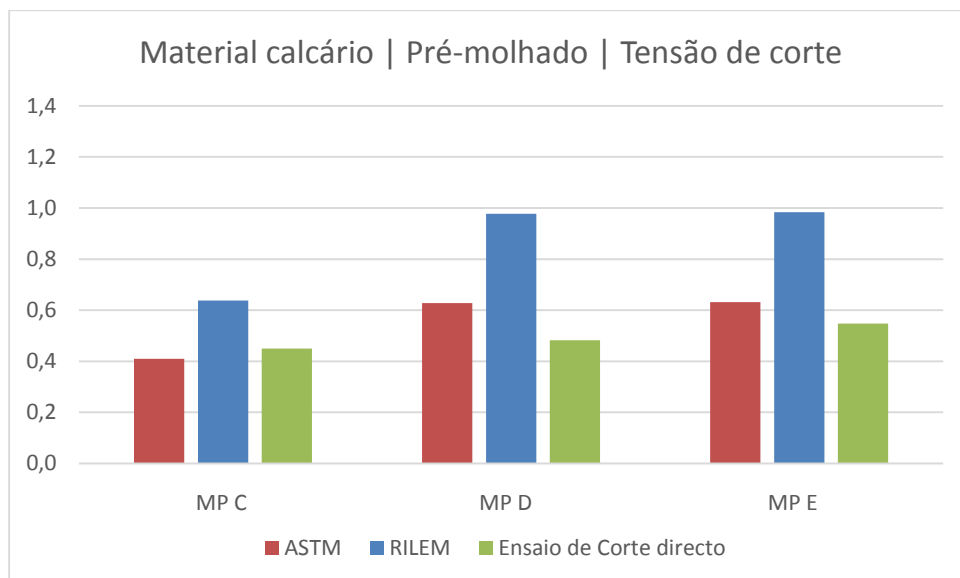


Figura 4.21 – Comparação do *diagonal test* com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material calcário no estado pré-molhado

O material cerâmico seco (Figura 4.22) apresenta valores muito diferentes entre os valores do meio poroso com partículas finas (MP C) e os meios porosos sem partículas finas (MP D e MP E).

Como no material calcário, a RILEM para o *diagonal test* apresenta valores muito superiores em relação à norma do *diagonal test* ASTM e para o ensaio de corte directo.

Existe maior semelhança mais uma vez entre a norma ASTM para o *diagonal test* com o ensaio de corte directo, onde para os meios porosos C e D, os valores da ASTM são superiores aos valores do ensaio de corte directo, enquanto no meio poroso E acontece o contrário (tal como no material calcário para o estado seco).

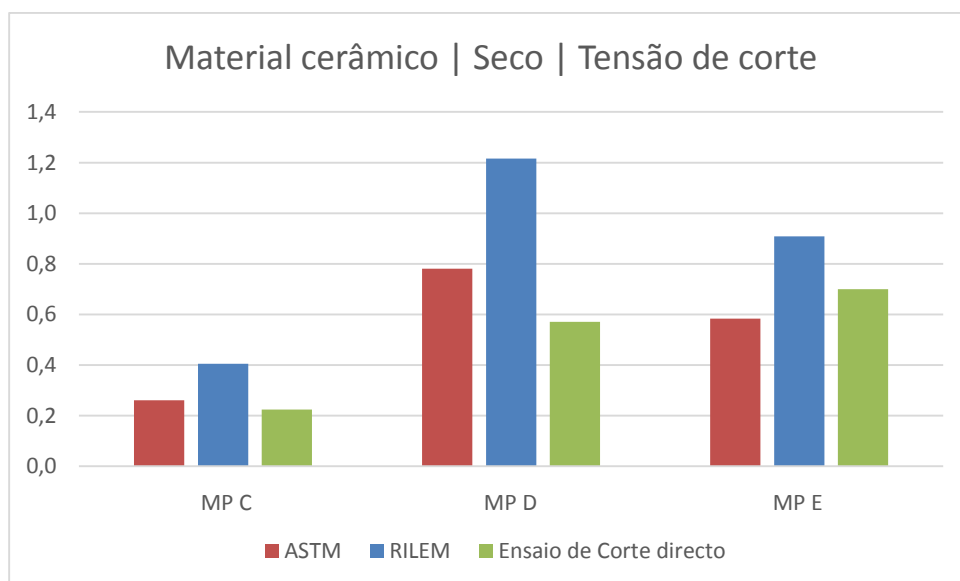


Figura 4.22 – Comparação do *diagonal test* com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material cerâmico no estado seco



A Figura 4.23 apresenta os resultados do *diagonal test* para as especificações ASTM e RILEM e do ensaio de corte directo do material cerâmico no estado pré-molhado.

A especificação RILEM apresenta valores muito superiores em relação aos outros parâmetros, mas apenas nos meios porosos D e E, já que no meio poroso C a RILEM apresenta um valor muito semelhante ao valor do ensaio de corte.

O material cerâmico quando pré-molhado apresenta a maior resistência ao corte, especialmente para os meios porosos D e E.

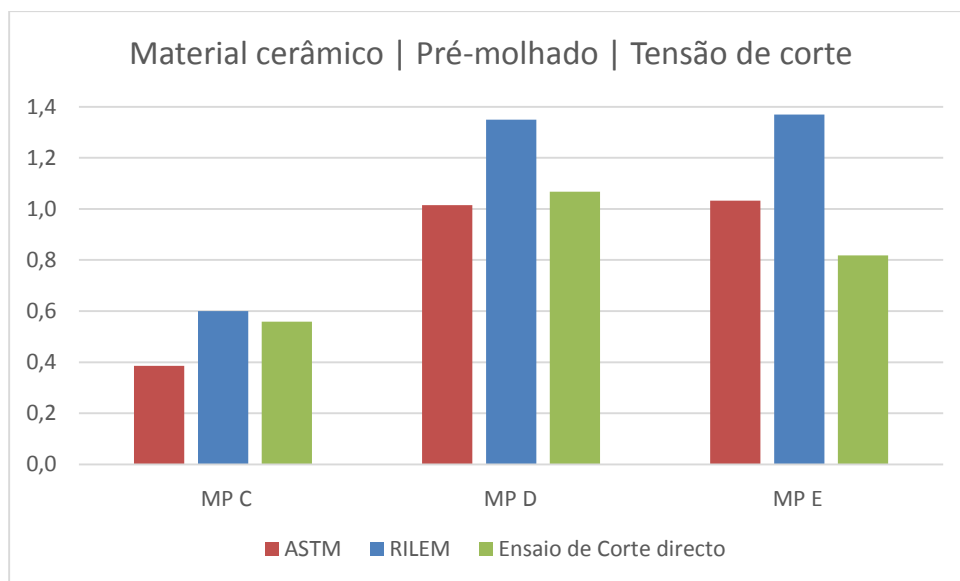


Figura 4.23 – Comparação do *diagonal test* com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material cerâmico no estado pré-molhado

Conclui-se que o ensaio que apresenta resultados mais semelhantes com o ensaio de corte directo é o *diagonal test* segundo a norma ASTM. Esta norma foi utilizada no presente trabalho e por isto conclui-se que a ASTM é mais aconselhável para a análise ao corte, que a especificação RILEM.

#### 4.11.2 Comparação com o ensaio de tracção por compressão diametral

Comparando agora o ensaio de tracção por compressão diametral (valores retirados da tese de dissertação de Coelho [41]) com o *diagonal test* com as duas especificações ASTM e RILEM. Como explicitado no capítulo 3.7.1, o *diagonal test* apresenta para as duas normas expressões de cálculo de tensão de tracção através do círculo de Mohr (ASTM: Equação 5 e RILEM: 8).

A análise de tensão de tracção é importante para o estudo das ligações entre o *grout* e as partículas do meio poroso, tal como na análise de corte por isso é importante fazer uma análise de relação entre estas duas propriedades.

A Figura 4.24 apresenta um gráfico muito interessante pois são visíveis as tendências entre valores, com os do *diagonal test* para as duas especificações superiores ao ensaio de tracção por compressão diametral, destacando-se o *diagonal test* com a ASTM.

Em todos os meiosporosos, o valor superior é apresentado pela norma ASTM, seguindo a especificação RILEM e por fim o valor do ensaio de tracção por compressão diametral. Onde observa-se maior semelhança entre o *diagonal test* da RILEM e o ensaio de tracção por compressão diametral.

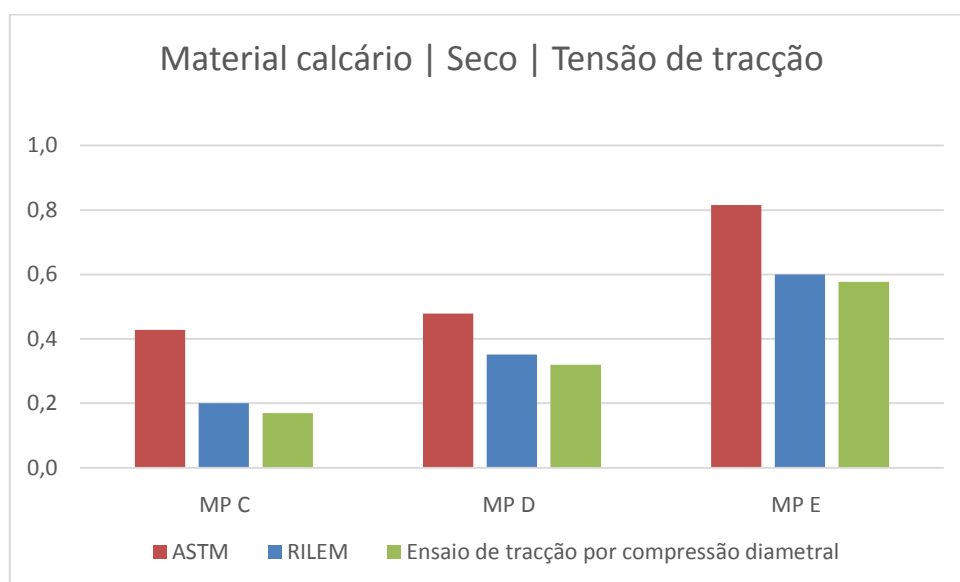


Figura 4.24 – Comparação do ensaio de tracção por compressão diametral com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material calcário no estado seco

Tendo em conta as especificações ASTM e RILEM do *diagonal test* e o ensaio de tracção por compressão diametral do material calcário no estado pré-molhado (Figura 4.25) é possível verificar as mesmas tendências identificadas em cima no estado seco, onde os valores de *diagonal test* apresentam superiores ao ensaio de análise à tracção.

Ainda referindo uma tendência verificada anteriormente no estado seco, existe maior semelhança entre o ensaio de tracção por compressão diametral e o *diagonal test* da especificação RILEM.

Na comparação entre meios porosos, o meio poroso C apresenta valores inferiores como seria expectável devido à sua parcela de partículas finas e os meios porosos C e D apresentam valores muito semelhantes.

Observando as diferenças entre a presença ou ausência de água, verifica-se em especial para o meio poroso E valores superiores no estado seco, pois este meio poroso apresenta maior quantidade de vazios.

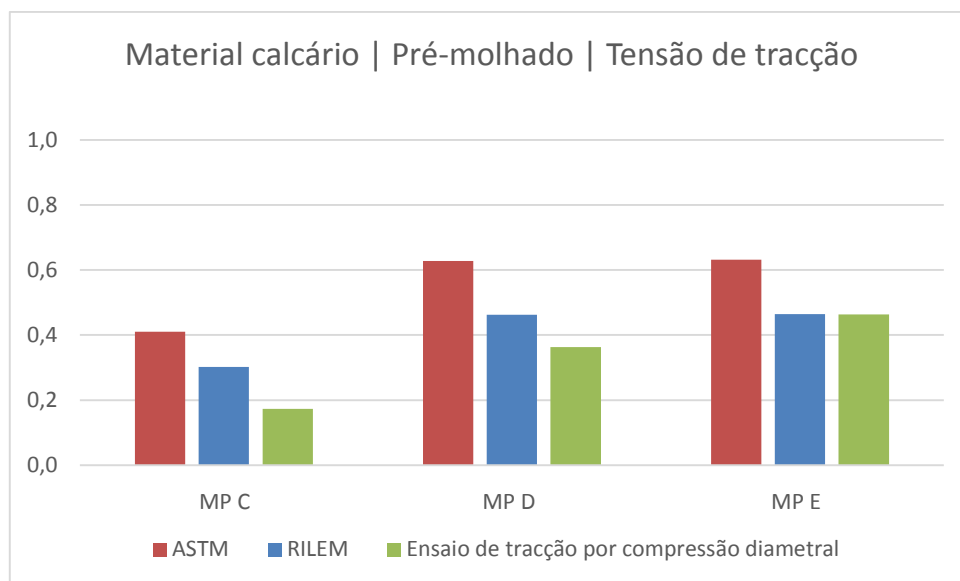


Figura 4.25 – Comparação do ensaio de tracção por compressão diametral com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material calcário no estado pré-molhado

Analisando agora os resultados do material cerâmico, observa-se que globalmente os valores são superiores em relação ao material calcário, pois o material cerâmico consegue implementar melhores ligações entre o *grout* e as partículas do meio poroso e assim melhor resistência à tracção. Neste caso o imbricamento não tem uma função tão importante como na resistência ao corte, especialmente quando o meio poroso é pré-molhado apresenta melhor capacidade de injeção, maior quantidade de volume de *grout* e por isso maior quantidade de ligações *grout*-partícula do meio. O material cerâmico apresenta valores de resistência mecânica superiores, pois as suas partículas apresentam maior atrito entre si e por isso maior aderência.

Observando a Figura 4.26, verifica-se que apenas os valores do meio poroso D não apresentam valores semelhantes, nos meios porosos C e E apresentam o mesmo nível de resultados.

Apenas o meio poroso D apresenta a tendência verificada anteriormente, em que o *diagonal test* na norma ASTM apresenta valores muito superiores, seguindo-se a RILEM para o *diagonal test* e por fim o ensaio de tracção por compressão diametral.

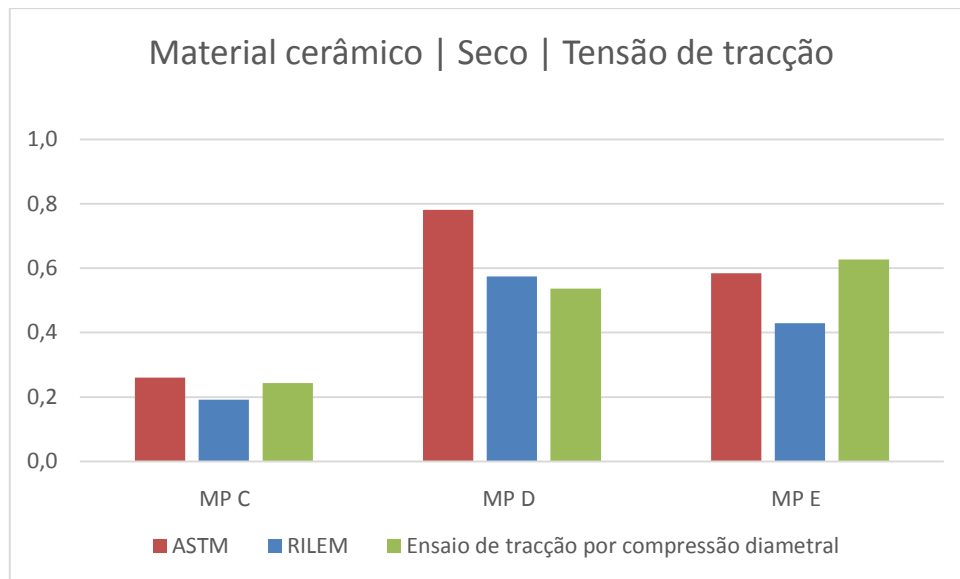


Figura 4.26 – Comparação do ensaio de tracção por compressão diametral com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material cerâmico no estado seco

A Figura 4.27 apresenta a mesma tendência entre parâmetros e entre meios porosos verificado anteriormente.

Entre parâmetros é visível que o *diagonal test* para a norma ASTM apresenta valores superiores, seguindo-se o *diagonal test* para a especificação RILEM e por fim as amostras do ensaio de tracção por compressão diametral. Com maior semelhança entre estes dois últimos, mas nos meios porosos D e E sem a semelhança verificada anteriormente (excepto o meio poroso de tijolo no estado seco).

Entre os meios porosos observa-se que o meio poroso C apresenta valores muito inferiores quando comparados com os meios porosos sem partículas finas devido à melhor coesão, já que os meios porosos D e E apresentam valores muito semelhantes.

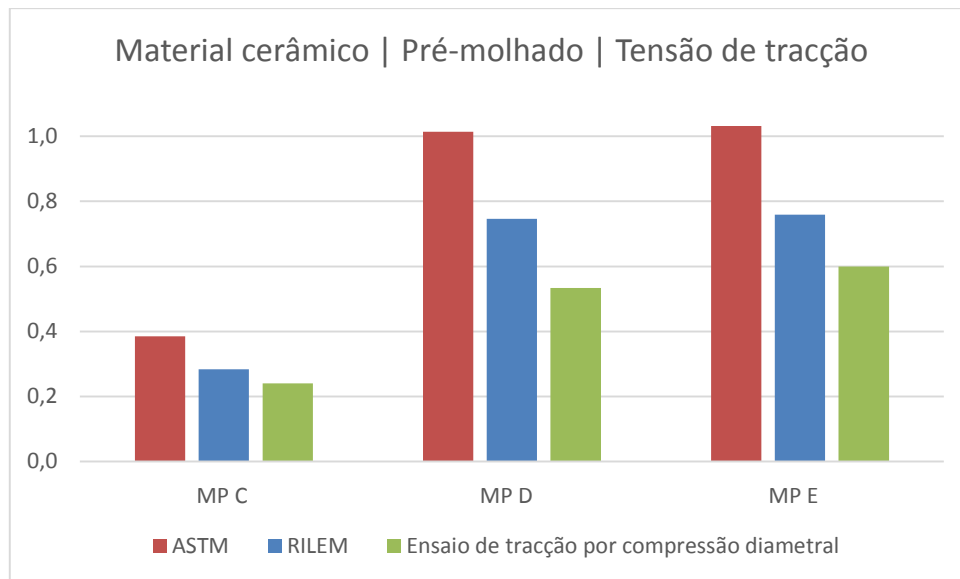


Figura 4.27 – Comparação do ensaio de tracção por compressão diametral com as especificações ASTM e RILEM com o ensaio de corte directo, para material cerâmico no estado pré-molhado

Enquanto que na análise de comparação da resistência ao corte observou-se que os valores do *diagonal test* segundo a norma ASTM são mais semelhantes, na análise de comparação da resistência à tracção observou-se que estes valores são mais semelhantes com os valores do *diagonal test* segundo a RILEM.

Conclui-se que a norma ASTM é mais aconselhável e mais conservativa para uma análise ao corte e a especificação RILEM é mais aconselhável e mais conservativa para uma análise à tracção.

## 4.12 Análise complementar com o uso da lupa binocular

Nesta análise apenas se utilizou as amostras de material cerâmico C e D e de material calcário C seco e pré-molhado, pois quando se utilizou as resinas apenas tinha-se disponíveis estas amostras, que já tinham sido ensaiadas mecânicamente. Ainda se realizaram com amostras de areia, mas optou-se por não utilizar neste trabalho, pois os materiais em foco são o material cerâmico e o material calcário.

### Material Cerâmico – Meio Poroso C

A imagem retirada a partir da Lupa Binocular está representada na Figura 4.28, onde à esquerda apresenta-se uma imagem e à direita com um *zoom in*. Na fotografia da esquerda salta à vista o orifício existente que pode ter sido causado pela saída de uma partícula do meio poroso ou por um vazio existente a quando a injecção. Mas o interessante nestas imagens, principalmente a imagem da direita, passa pela capacidade do *grout* conseguir preencher a interface e assim fortalecer as tais ligações *grout-partícula* do meio poroso.

Assim, a partir destas imagens podemos confirmar a forte ligação entre os partículas do meio poroso e o *grout* como foi visto em 4.7 e em 4.8 para o *diagonal test* e para o ensaio de corte directo, respectivamente.

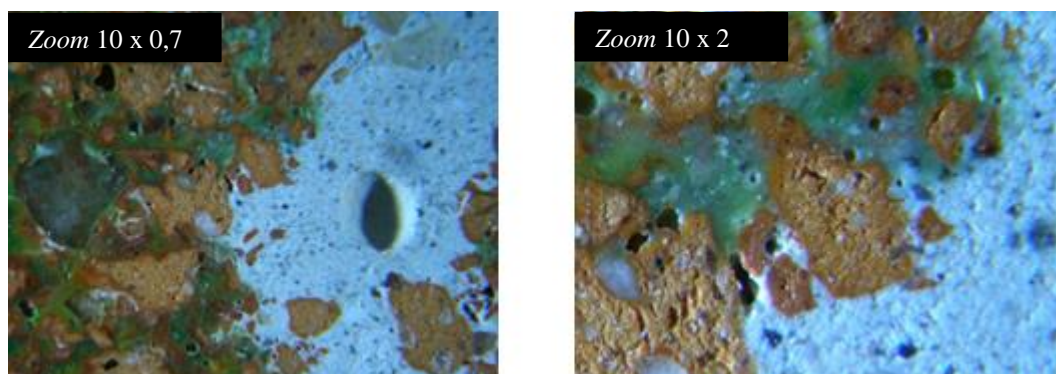


Figura 4.28 – Imagem captada na lupa binocular para o material cerâmico do meio poroso C

## Material Cerâmico – Meio Poroso D

No meio poroso D a Figura 4.29 é mais visível o *grout* no interior das partículas, muitos destes pontos de *grout* podem não ser poros interiores mas sim faces externas da partícula, mas com imagens 2D não é perceptível essa diferença. Estas partículas de ligante entrando nos poros permitem uma boa ligação entre o *grout* e as partículas do meio poroso. Comparando com o meio poroso C no caso anterior, é perceptível a maior quantidade de poros com partículas de *grout* do meio poroso em relação ao meio poroso C, daí a geral maior resistência ao corte apresentada nos outros sub-capítulos.

Entre o meio poroso C e D observa-se uma melhor distribuição do *grout* no meio poroso D, e de acordo com o sub-capítulo 4.1, a velocidade de propagação de ultra-sons é superior para o meio poroso D em relação ao C, podendo assim concluir-se que também é uma boa análise de comparação.

Caso estes meios fossem pré-molhados, alguns poros de pequena dimensão deveriam estar vazios, seria um estudo interessante para ser realizado para o material cerâmico e deve ser proposto como desenvolvimento futuro.

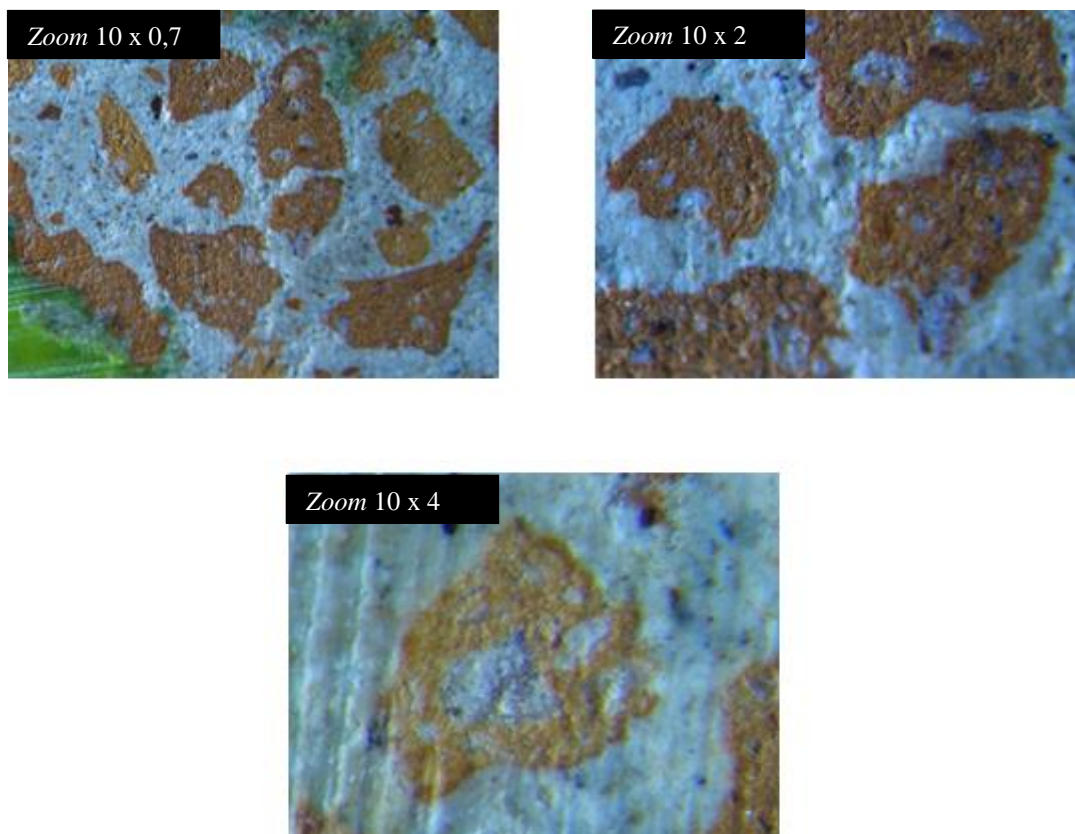


Figura 4.29 – Imagem captada na lupa binocular para o material cerâmico do meio poroso D

### Material Calcário – Meio Poroso C

No material calcário para o meio poroso C (Figura 4.30), é possível verificar uma boa distribuição do *grout* como é perceptível pelo valor de injectibilidade de 0,82 de acordo com o Quadro 4.1.

As partículas do material calcário apresentam menor quantidade de interfaces preenchidas e por isso apresentam menor coesividade quando comparadas com as do material cerâmico, assim o material calcário apresenta menor resistência ao corte devido à sua menor ligação entre partículas do meio poroso e o *grout*. Ainda pode-se visualizar que nas amostras de material calcário existe menor imbricamento em partículas do meio poroso e por isso menor resistência ao corte.

Ainda interessante de referir que em volta das partículas do meio poroso encontra-se uma “camada” visível através do seu tom diferente, pensa-se que seja o efeito parede causado pelas superfícies das partículas do meio poroso, sendo necessário um estudo mais detalhado para comprovar esta teoria.



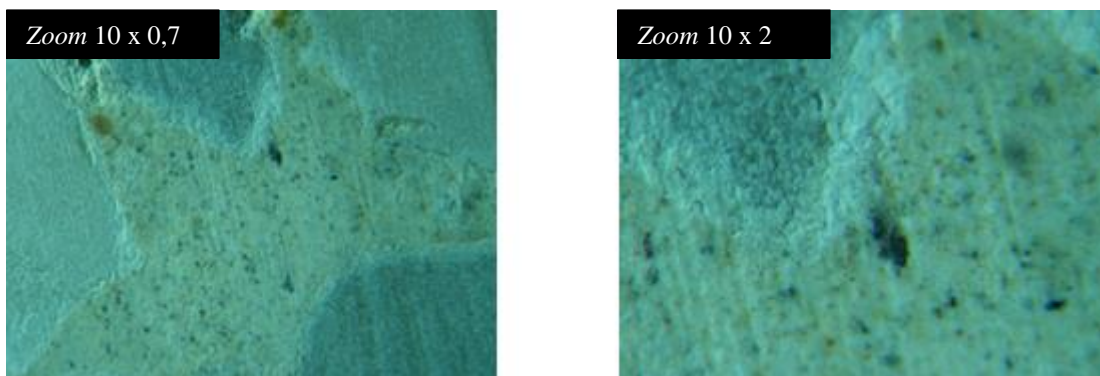


Figura 4.30 – Imagem captada na lupa binocular para o material calcário do meio poroso C

### Material Calcário – Meio Poroso C - Pré-molhado

No material calcário para o meio poroso C pré-molhado (Figura 4.31) apresenta melhor imagem do que o a Figura 4.30, isto porque o polimento foi realizado de melhor forma. Na Figura 4.31 é visível alguns orifícios causados pela presença de água da pré-molhagem como o orifício à direita da imagem da direita.

Na Figura 4.31 do lado esquerdo, é possível observar uma grande área verde que representa os vazios existentes, isto é, a resina de cor verde preenche os espaços vazios. Ora assim a quantidade de *grout* é menor, as interfaces apresentam reduzida coesão e consequentemente a resistência global é inferior.

A camada envolta sobre as partículas tem menor espessura que no caso seco, isto pode induzir que a ligação *grout*-partícula do meio poroso seja inferior na pré-molhagem e por isso menor resistência ao corte como observou-se nos sub-capítulos para o *diagonal test* em 4.7 e para o ensaio de corte directo em 4.8.

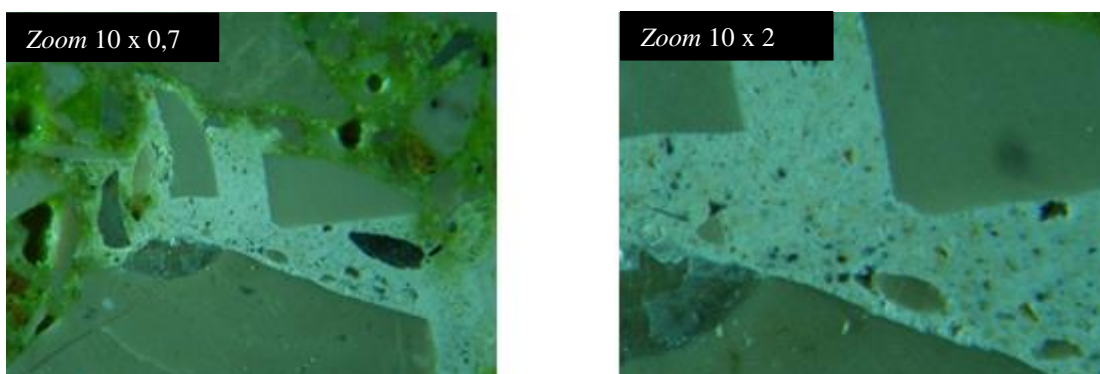


Figura 4.31 – Imagem captada na lupa binocular para o material calcário do meio poroso C pré-molhado



## 5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Após a análise e discussão de resultados dos diversos estudos, concluiu-se vários aspectos relacionados com a análise ao corte em paredes de alvenaria de pano múltiplo.

A injectibilidade apresentou resultados muito semelhantes a estudos anteriores ([41] e [42]), com valores superiores nas amostras pré-molhadas devido ao maior ângulo de contacto e valores superiores para as amostras dos meios porosos sem partículas finas. No material cerâmico para as amostras secas, as fatias superiores apresentam reduzido volume de *grout*, pois o *grout* perde capacidade de injeção, devido à perda de água livre do *grout*.

Na avaliação realizada para o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons verificou-se que os meios porosos com maior compacidade são os meios porosos de material calcário, pois apresentam maior massa volúmica e a injectibilidade toma maior preponderância.

Os meios porosos D e E apresentam maiores velocidades, justificado pela melhor injectibilidade e menor quantidade de interfaces que provocam atenuação acústica, quando comparados com o meio poroso C.

Os transdutores cilíndricos apresentaram valores de velocidades superiores em relação aos transdutores cónicos. Para além disso, os transdutores cilíndricos apresentam valores mais constantes e por isso mais fiáveis, pois estes transdutores apresentam menor desvio padrão nas medições executadas (4.3). Nos transdutores cónicos a resolução no campo próximo é reduzida, uma vez que o feixe emitido apresenta uma forma triangular e neste caso as ondas podem-se cruzar e causar interferências. Enquanto que os transdutores cilíndricos emitem ondas paralelas entre si e consequentemente causam menor quantidade de interferências.

No *diagonal test* e no ensaio de corte directo verificou-se que os valores para o material cerâmico apresentavam valores superiores em relação ao material calcário, dado que as ligações entre o *grout*-partícula do meio poroso e o imbricamento entre partículas são melhores. As ligações mecânicas, epitáxicas e químicas apresentam assim melhor qualidade no material cerâmico em relação ao material calcário.

As partículas finas presentes no meio poroso C, apresentam elevada superfície específica, o que obriga a uma maior quantidade de água perdida do *grout*, provocando menor capacidade de injeção e afectando ainda o processo de hidratação, pois a relação entre a água e o ligante é reduzida. Acabando por resultar numa menor resistência mecânica.

Quanto às amostras pré-molhadas, verificou-se que no material cerâmico estas apresentam maior resistência ao corte, principalmente porque a quantidade de *grout* injectado é superior em relação às amostras secas. Se a injeção fosse completamente preenchida a amostra seca teria resistência superior, porque a absorção é superior quando as paredes das partículas não estão molhadas e porque o *grout* apresenta melhor estabilidade. Assim, quando uma alvenaria real apresenta na sua constituição grande percentagem de material cerâmico é de boa conduta realizar uma pré-molhagem, pois é preferível

os vazios serem bem preenchidos por *grout* e atingirem uma resistência inferior, do que o *grout* não conseguir chegar a todas as zonas e a resistência ser superior.

No material calcário as amostras pré-molhadas apresentam menor resistência ao corte, pois o material calcário apresenta reduzida porosidade e a maior parte da água será água livre, principalmente a fatia superior apresenta menor resistência ao corte devido a um fenómeno observado em laboratório apresentado no capítulo 4.7.2.

Na comparação entre o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e os dois ensaios de análise de corte foi possível verificar que seguiam as mesmas tendências entre os resultados obtidos.

Na análise realizada para o *diagonal test* com as duas perspectivas das especificações ASTM e RILEM, observou-se que a grande diferença está na uniformidade de tensões na diagonal comprimida, defendida pela ASTM. Comparando estas duas especificações com o ensaio de corte directo e com o ensaio de tracção por compressão diametral foi possível verificar que a RILEM apresenta valores mais próximos na análise à tracção e a norma ASTM valores mais semelhantes na análise ao corte directo. Assim pode-se afirmar que a norma ASTM é a mais adequada na análise ao corte.

A análise complementar com o uso da lupa binocular mostrou ser uma análise interessante para compreensão da morfologia interna, dado que mostrou de que forma os vazios são preenchidos e de que forma algumas ligações são estabelecidas. De destacar as interessantes imagens para o material cerâmico, que apresentam no interior das partículas do meio poroso algumas partículas de *grout*, com a ressalva feita no capítulo 4.12. Caso estes meios fossem pré-molhados, alguns poros de pequena dimensão deveriam estar vazios, pois as partículas de água que conseguiram entrar nos poros evaporaram no processo de cura. Sendo assim seria interessante como desenvolvimento futuro realizar um estudo para o material cerâmico pré-molhado.

Além disso, como desenvolvimentos futuros seria de grande importância o desenvolvimento de um ensaio com a utilização simultânea de compressão e de corte para determinação do ângulo de fricção interna e a coesão, a partir da teoria de Mohr-Coloumb, que foi pensado no capítulo 3.8.

Outro tema que deve ser estudado com maior ênfase é o estudo das ligações entre panos. A análise do comportamento monolítico é de extrema importância quando aplicado um carregamento horizontal, como um sismo.

O uso de silicões no *grout* fresco é outro assunto interessante a ser estudado, com o intuito de aumentar os ângulos de contacto (para  $\theta > 90^\circ$ ), que conduzirá a menores pressões capilares e melhores capacidades de injeção.

Finalmente referir que a injeção de *grouts* apresenta-se como uma técnica muito interessante e eficiente, tanto numa análise de corte como noutra tipo de carregamentos, no entanto esta técnica apresenta melhores resultados quando é utilizada em consonância com outras técnicas, dado que a mesma não apresenta resistência a todo o tipo de esforços.

## 6. BIBLOGRAFIA

- [1] F. Jorne, F. M. A. Henriques, and L. G. Baltazar, "Evaluation of consolidation of grout injection with ultrasonic tomography," *Constr. Build. Mater.*, vol. 66, pp. 494–506, Sep. 2014.
- [2] V. Gemert, B. Prof, and V. Balen, "Grout injection of masonry, scientific approach and modeling," Doctoral Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2000.
- [3] A. Brás, "Grout optimization for masonry consolidation," Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologias Da Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [4] F. Jorne and F. M. A. Henriques, "Study of hydraulic lime grout injections in different porous media: an experimental study," *Struct. Stud. Repairs Maint. Herit. Archit. XIII*, vol. 131, pp. 431–442, Jun. 2013.
- [5] C.-E. Adami and E. Vintzileou, "Interventions to historic masonries: Investigation of the bond mechanism between stones or bricks and grouts," *Mater. Struct.*, vol. 41, pp. 255–267, 2008.
- [6] L. Binda, C. Modena, G. Baronio, and S. Abbaneo, "Repair and investigation techniques for stone masonry walls," *Constr. Build. Mater.*, vol. 11, no. 3, pp. 133–142, Apr. 1997.
- [7] C. Mazzotti, E. Sassoni, and G. Pagliai, "Determination of shear strength of historic masonries by moderately destructive testing of masonry cores," *Constr. Build. Mater.*, vol. 54, pp. 421–431, 2014.
- [8] A. Anzani, L. Binda, M. Lualdi, C. Tedeschi, L. Zanzi, and D. I. S. P. Milano, "Use of Sonic and GPR Tests to Control the Effectiveness of Grout Injections of Stone Masonry," in *ECNDT 2006*, 2006, vol. 3, pp. 1–7.
- [9] F. Jorne and F. M. A. Henriques, "Avaliação da técnica de injeção de grouts recorrendo ao ensaio de ultra-sons e tomografia ultra-sónica," in *Congresso Construção Coimbra 2012*, 2012, pp. 1–12.
- [10] L. Binda and A. Saisi, "State of the Art of Research on Historic Structures in Italy," *Dept Struct. Eng. - Politec. Milan Italy*, 1996.
- [11] M. Corradi, C. Tedeschi, L. Binda, and A. Borri, "Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: Deep repointing," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, pp. 463–472, 2008.
- [12] A. Kalagri, A. Miltiadou-Fezans, and E. Vintzileou, "Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures," *Materials and Structures*, vol. 48, pp. 2211–2233, 2015.
- [13] F. Jorne, F. M. A. Henriques, and L. G. Baltazar, "Injection capacity of hydraulic lime grouts in different porous media," *Mater. Struct.*, Apr. 2014.
- [14] A. Bras and F. M. A. Henriques, "Natural hydraulic lime based grouts – The selection of grout injection parameters for masonry consolidation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 135–144, Jul. 2011.

- [15] N. G. Almeida, A. Paula, F. Pinto, and A. Gomes, “Caldas de injeção para alvenarias antigas fluidez versus capacidade de injeção,” *Congr. Construção Coimbra 2012*, pp. 1–12, 2012.
- [16] V. Fernández-Altable and I. Casanova, “Influence of mixing sequence and superplasticiser dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, pp. 1222–1230, 2006.
- [17] N. Roussel, “Rheology of fresh concrete: from measurements to predictions of casting processes,” *Mater. Struct.*, vol. 40, pp. 1001–1012, 2007.
- [18] C. F. Ferraris, “Measurement of Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report,” *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 104(5), pp. 461–478, 1999.
- [19] V. A Hackley and C. F. Ferraris, “Guide to Rheological Nomenclature : Measurements in Ceramic Particulate Systems Guide to Rheological Nomenclature : Measurements in Ceramic Particulate,” *Nist Spec. Publ.*, p. 31, 2001.
- [20] A. Bras, F. M. A. Henriques, and M. T. Cidade, “Effect of environmental temperature and fly ash addition in hydraulic lime grout behaviour,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 8, pp. 1511–1517, Aug. 2010.
- [21] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, and F. Jorne, “Optimisation of flow behaviour and stability of superplasticized fresh hydraulic lime grouts through design of experiments,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 838–845, Oct. 2012.
- [22] F. Mahaut, S. Mokéddem, X. Chateau, N. Roussel, and G. Ovarlez, “Effect of coarse particle volume fraction on the yield stress and thixotropy of cementitious materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 11, pp. 1276–1285, Nov. 2008.
- [23] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, F. Jorne, and M. T. Cidade, “Combined effect of superplasticizer, silica fume and temperature in the performance of natural hydraulic lime grouts,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 584–597, Jan. 2014.
- [24] F. M. A. Henriques, *Humidade em Paredes*, Coleção E. Lisboa: LNEC: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994.
- [25] F. M. A. Henriques, “Comportamento Higrotérmico de Edifícios”. Sebenta: Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica. 2007.
- [26] M. R. Valluzzi, “Requirements for the choice of mortar and grouts for consolidation of three-leaf stone walls,” *Proc. Int. RILEM Work. Repair Mortar Hist. Mason.*, no. January, 2005.
- [27] F. Jorne, V. Silva, and C. Rosa, “Caracterização de alvenarias antigas - Levantamento tipológico, análise das secções e caracterização dos materiais,” *CONPAT- Congresso Internacional em Reabilitação de Construções*, 2014.
- [28] S. Grasso and M. Maugeri, “The road map for seismic risk analysis in a Mediterranean city,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 29, pp. 1034–1045, 2009.
- [29] P. B. Lourenço and J. a. Roque, “Simplified indexes for the seismic vulnerability of ancient masonry buildings,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, pp. 200–208, 2006.

- [30] V. Mallardo, R. Malvezzi, E. Milani, and G. Milani, "Seismic vulnerability of historical masonry buildings: A case study in Ferrara," *Eng. Struct.*, vol. 30, pp. 2223–2241, 2008.
- [31] G. Augusti, M. Ciampoli, and P. Giovenale, "Seismic vulnerability of monumental buildings," *Struct. Saf.*, vol. 23, pp. 253–274, 2001.
- [32] A. Kalali and M. Z. Kabir, "Experimental response of double-wythe masonry panels strengthened with glass fiber reinforced polymers subjected to diagonal compression tests," *Eng. Struct.*, vol. 39, pp. 24–37, 2012.
- [33] J. Milosevic, A. S. Gago, M. Lopes, and R. Bento, "Experimental assessment of shear strength parameters on rubble stone masonry specimens," *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1372–1380, 2013.
- [34] N. Ismail, R. B. Petersen, M. J. Masia, and J. M. Ingham, "Diagonal shear behaviour of unreinforced masonry wallettes strengthened using twisted steel bars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, pp. 4386–4393, 2011.
- [35] D. Van Gemert, "The use of grouting for the consolidation of historic masonry constructions, stable-unstable," *Struct. Consol. Anc. Build.*, no. Leuven (Belgium): Leuven University Press, pp. 265–76, 1988.
- [36] D. Van Gemert, S. Ignoul, K. Brosens, and E.-E. Toumbakari, "Consolidation and Strengthening of Historical Masonry by Means of Mineral Grouts: Grout Development," *Restor. Build. Monum.*, vol. 21, no. 1, pp. 29–46, 2015.
- [37] F. Pinho, "Paredes de Alvenaria Ordinária - Estudo experimental com modelos simples e reforçados," Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2007.
- [38] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, F. Jorne, and M. T. Cidade, "Performance improvement of hydraulic lime based grouts for masonry consolidation: an experimental study," pp. 417–430, Jun. 2013.
- [39] Ribeiro N., "Caldas De Injecção Cimentícias Para Bainhas De Pré-Esforço Estudo Da Sua," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [40] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, F. Jorne, and M. T. Cidade, "The use of rheology in the study of the composition effects on the fresh behaviour of hydraulic lime grouts for injection of masonry walls," *Rheol. Acta*, vol. 52, no. 2, pp. 127–138, Jan. 2013.
- [41] P. M. Coelho, "Avaliação da injeção de grouts em alvenarias antigas com ensaios não destrutivos," *Diss. para obtenção do grau Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nov. Lisboa, Lisboa*, 2013.
- [42] J. D. A. Guerreiro, "Avaliação do efeito combinado de temperatura , tempo de repouso e pressão de injeção na eficiência de injeção de grouts," *Diss. para obtenção do grau Mestre em Eng. Civil, Fac. Ciências e Tecnol. da Univ. Nov. Lisboa, Lisboa*, 2014.
- [43] J. Gołaszewski, "Influence of cement properties on new generation superplasticizers performance," *Silesian Univ. Technol.*, vol. 5, pp. 44–100, 2012.

- [44] F. Van Rieckstal, "Grout injection of masonry, scientific approach and modeling," Doctoral Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2000.
- [45] L. Binda, G. Baronio, C. Tiraboschi, and C. Tedeschi, "Experimental research for the choice of adequate materials for the reconstruction of the Cathedral of Noto," *Constr. Build. Mater.*, vol. 17, no. 8, pp. 629–639, Dec. 2003.
- [46] L. Binda, M. Lualdi, and A. Saisi, "Non-Destructive Testing Techniques Applied for Diagnostic Investigation: Syracuse Cathedral in Sicily, Italy," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 1, no. March 2015, pp. 380–402, 2007.
- [47] M. Camplani, B. Cannas, S. Carcangiu, G. Concu, A. Fanni, A. Montisci, and M. L. Mulas, "LNCS 5073 - Acoustic Tomography for Non Destructive Testing of Stone Masonry," pp. 596–605, 2008.
- [48] ASTM, "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. C 597-02, United States," *ASTM*, pp. 4–7, 1989.
- [49] T. A. Whittingham, "Medical diagnostic applications and sources," *Prog. Biophys. Mol. Biol.*, vol. 93, pp. 84–110, 2007.
- [50] ASTM, "Standard Test Method for Diagonal Tension ( Shear ) in Masonry Assemblages. E 519 – 02, United States," *ASTM*, pp. 1–5, 2002.
- [51] RILEM TC. 1994. 76-LUM, "Diagonal tensile strength tests of small wall specimens," *RILEM, London E& FN SPON*, pp. 488–489, 1994.
- [52] A. Brignola, S. Frumento, S. Lagomarsino, and S. Podestà, "Identification of Shear Parameters of Masonry Panels Through the In-Situ Diagonal Compression Test," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 3, no. March 2015, pp. 52–73, 2008.
- [53] V. Alecci, M. Fagone, T. Rotunno, and M. De Stefano, "Shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 1038–1045, 2013.
- [54] C. Mazzotti, E. Sassoni, and V. Rinaldini, "Shear strength of an early XX century masonry building : comparison among different testing techniques," *9th Int. Mason. Conf. 2014 Guimarães*, pp. 1–11, 2014.
- [55] V. Rato, "Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas," Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologias Da Universidade Nova de Lisboa, 2006.
- [56] E. Toumbakari, "Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls," Doctoral Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2002.
- [57] A. de S. Coutinho, *Fabrico e propriedades do betão - Volume II*, 2006th ed. Lisboa: LNEC, 1973.
- [58] F. Jorne, F. M. A. Henriques, and L. G. Baltazar, "Injection capacity of hydraulic lime grouts in different porous media," *Materials and Structures*, vol. 48, pp. 2211–2233, 2015.
- [59] D. C. Park, "Carbonation of concrete in relation to CO<sub>2</sub> permeability and degradation of coatings," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, pp. 2260–2268, 2008.

## ANEXOS

Quadro A.1 – Injectibilidade dos meios porosos, com a massa do *grout* e o volume de vazios

Material	Meio Poroso	Presença de água	Massa de Grout [Kg]	Vol.Vazios (cm3)	"I" grout injectability (-)
Calcário	C	Seco	4,65	2606	0,82
		Pré - molhado	4,72	2541	0,84
	D	Seco	5,15	3051	0,85
		Pré - molhado	5,03	2950	0,86
	E	Seco	5,25	2821	0,94
		Pré - molhado	4,76	2850	0,83
Cerâmico	C	Seco	4,53	2945	0,76
		Pré - molhado	5,18	2907	0,81
	D	Seco	4,53	3679	0,75
		Pré - molhado	5,66	3252	0,88
	E	Seco	5,68	3073	0,84
		Pré - molhado	5,62	3137	0,92